

화상 증분 축적법을 이용한 등고선 간섭무늬의 개선

강영준*, 김계성**, 유원재**, 권용기***

Improvement of Contour Fringes by using Addition of Incremental Images

Young June Kang*, Gye Sung Kim**, Weon Jae Ryu** and Yong Ki Kwon***

ABSTRACT

Electronic speckle contouring(ESC) is the optical method for measuring shape by using fringe-projection techniques in electronic speckle pattern interferometry. It has the advantage of being non-contacting and can also give a field view of the surface under investigation. Fringes in ESC represent the difference in depth along the view direction between the master wavefront and the test component.

The contour maps of three-dimensional diffuse objects are obtained by small shifts of optical fiber carrying the dual-object-beams and 4-frame phase shift.

We proposed the contouring method by shifting the collimated illumination beams through optical fiber in order to obtain the contour fringe patterns. And also, we performed addition of incremental images through the geometrical analysis to obtain the contour fringe interval when performed incremental addition of images and experiments based on it. we obtained both quantitative increment without decorrelation effect and qualitative improvement by reducing the noise of contour fringes.

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry (전자 스페클 패턴 간섭법), Phase Shifting (위상 이동), Geometric Analysis (기하학적 해석), Electronic Speckle Contouring (전자 스페클 등고선 추출법), Incremental Addition Image (화상 증분 축적)

기호설명

K = Unit direction vector of two waves
 Ψ = Phase of the interference speckle pattern
 $\Delta\Psi$ = Phase difference between two speckle pattern
 θ = Illumination angle of two beam

$\Delta\theta$ = Scanning angle of beam
 λ = Wavelength of the illumination beam
 r_m = Position vector
 $\gamma(x, y)$ = Modulation of the fringe pattern
 $I_i(x, y)$ = Intensity distribution of the interferogram

* 전북대학교 기계공학부, 메카트로닉스 연구센터
 ** 전북대학교 대학원
 *** 전주공업대학 기계과

1. 서론

1969년에 물체의 전체 변위장을 관찰하기 위한 비접촉· 비파괴 방법으로서 Butters와 Leendertz에 의해 개발된 전자 스펙클 패턴 간섭법⁽¹⁾은 개발된 후 비약적인 발전을 거듭하며 70년대 후반부터는 항공기 산업, 원자력 산업, 자동차 산업, 토목 산업 등 산업 현장에 응용되고 있는 광학식 비파괴 검사법이다. 이 전자 스펙클 패턴 간섭법을 이용한 많은 측정법 중에서 형상 측정에 이용된 것이 바로 본 논문의 전자 스펙클 등고선 추출법(electronic speckle contouring, ESC)이다⁽²⁻⁵⁾. 이 전자 스펙클 등고선 추출법은 한번의 측정으로 대상체의 전면적의 측정이 가능하기 때문에 기존의 주류를 형성해 온 형상 측정법인 삼차원 형상 측정기나 점이나 선의 주사방식을 이용한 광학식 측정법이 가지고 있던 시간 소모성과 측정 부위의 한계성을 극복할 수 있다.

전자 스펙클 등고선 추출법은 대상 물체의 높이와 형상에 대해 일정 등고선 간격(contour interval)의 간섭무늬를 얻고, 이를 통하여 3차원 물체의 형상 정보를 얻는 광학적 방법으로서, 이전 논문에서 등고선 간섭무늬 형상과정에 대한 기하학적 해석과 등고선 간섭무늬의 특성에 대해 상세하게 설명하였다⁽⁶⁾.

본 논문에서는 확산빔(diffused beam)이 아닌 시준빔(collimated beam)과 위상 이동법⁽⁷⁾을 이용한 3차원 형상측정을 수행하였고, 간섭무늬의 양적 증가와 질적 개선을 위해 화상 증분 축적(Incremental addition image)법⁽⁸⁻¹⁰⁾을 이용하였다. 화상 증분 축적에 의한 3차원 물체의 등고선 높이 계산식을 기하학적 해석을 바탕으로 하여 산출하였으며, 간섭계의 성능분석을 위해 시준빔을 이용한 3차원 형상 측정을 수행하였다. 이를 바탕으로 하여 최종적으로 화상 증분 축적을 수행하였고, 그를 통하여 간섭무늬의 비상관 효과에 의해 제한되었던 변위의 제한을 탈피할 수 있었다.

2. 간섭무늬 해석 이론

전자 스펙클 패턴 간섭법에서 물체의 변형과 사용된 광원의 파장과 관계된 간섭무늬의 간격은 두 간섭 스펙클 패턴의 위상차에 의해 결정되는데, 이 위상차가 물체의 높이와 관계가 있을 때, 이 위상

차에 의하여 유발된 간섭무늬를 해석함으로써 3차원 물체의 형상을 측정하는 방법이 전자 스펙클 등고선 추출법(electronic speckle contouring, ESC)이다.

본 연구는 두 물체 조사빔의 이동을 바탕으로 하며, 그에 대한 기하학적 개략도는 Fig. 1과 같다. 본 연구의 이전 논문에서는 Fig. 1의 기하학적 구조에 대한 해석을 통하여 간섭무늬 간격에 대한 이론식을 산출하였고, 이 간섭무늬 간격과 물체의 높이와의 관계에 대한 이론을 정립하였었다. 본 연구에서는 그 간섭무늬 간격 산출식을 근거로 하여 화상 증분 축적에서의 간섭무늬 간격의 이론식을 산출하였다.

Fig. 1에서 두 조사빔은 물체상의 한 점 M을 통하여 관찰점인 P로 들어오게 된다. $\Delta\theta$ 는 물체의 형상을 측정하기 위한 이동량인데, 화상 증분 축적은 같은 양의 이 $\Delta\theta$ 를 여러 번 이동하고 그를 계속 더함으로서 수행되기 때문에 n번의 화상 증분 축적을 위해 사용되는 이동량은 $n \Delta\theta$ 가 된다.

두 조사빔에 의해 형성되는 간섭스펙클 패턴의 변형 전후의 위상 ψ_{m1} 과 ψ_{m2} 은

$$\begin{aligned} \psi_{m1} &= \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (K_1 - K_2) \\ \psi_{m2} &= \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (K_1' - K_2') \end{aligned} \tag{1}$$

으로 주어진다.

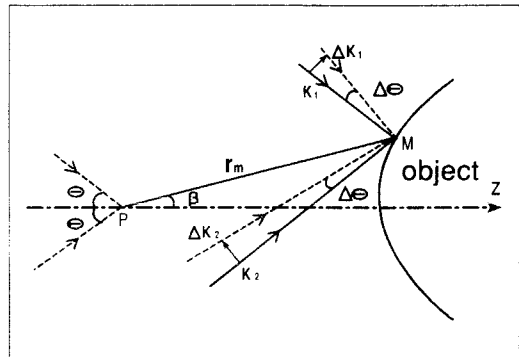


Fig. 1 Geometry of dual-beam-shifted electronic speckle contouring

그러하여 변화된 전파후의 위상차는

$$\begin{aligned} \Delta \Psi_m &= \Psi_{m2} - \Psi_{m1} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (\Delta K_1 - \Delta K_2) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} |r_m| |\Delta K_1 - \Delta K_2| \cos \beta \end{aligned} \quad (2)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

여기에서, 우리가 조사각 θ 를 $\Delta\theta$ 만큼 n 번 변화시키고, n 개의 증가된 이미지들을 차례로 더하면, n 번 증분된 결과의 위상차 $\Delta\Psi_{mn}$ 은

$$\begin{aligned} \Delta \Psi_{mn} &= (\Psi_{m(n+1)} - \Psi_{mn}) + (\Psi_{mn} - \Psi_{m(n-1)}) \\ &\quad + \dots + (\Psi_{m2} - \Psi_{m1}) \\ &= (\Psi_{m(n+1)} - \Psi_{m1}) \end{aligned} \quad (3)$$

이 된다.

따라서 이미지들을 n 번 증분한 결과의 최종 위상차 $\Delta\Psi_{mn}$ 은

$$\begin{aligned} \Delta \Psi_{mn} &= \Psi_{m(n+1)} - \Psi_{m1} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} r_m \cdot (\Delta K_1^n - \Delta K_2^n) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} |r_m| |\Delta K_1^n - \Delta K_2^n| \cos \beta \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (2 \sin \theta) r_m \cos \beta n \Delta \theta \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} \Delta K_1^n &= K_1^{(n+1)} - K_1 \\ \Delta K_2^n &= K_2^{(n+1)} - K_2 \\ |\Delta K_1^n| &= |\Delta K_2^n| = n \Delta \theta |K_1| \\ &= n \Delta \theta |K_2| = n \Delta \theta \end{aligned}$$

여기에서, $h = r_m \cos \beta$ 라 하면,

두 조사각 ΔK_1 과 ΔK_2 가 축대칭일 때 h 는

Z축을 따라 물체의 높이를 나타낸다. 그러하여 n 번 증분된 결과 화상에서 등고선 간격(contour depth)은 최종적으로 다음과 같이 표현된다.

$$d = \frac{\lambda}{2 n \sin \theta \Delta \theta} \quad (5)$$

이 식은 조사각이 $\Delta\theta$ 만큼 n 번 변화되고, 이 n 개의 위상 간섭무늬 패턴들을 증분시키면 민감도는 n 배 만큼 더 작게 됨을 의미한다. 즉, 감도의 증가에 따라 변위, 형상 측정 범위를 증가시킬 수 있음을 나타내고 있다. 그리고, 이 식에 의해 산출된 등고선 간섭무늬 간격은 형상 측정 실험시에 실제 형상을 측정하는 민감도로서 사용되어진다.

3. 위상 이동법

위상 이동법은 물체의 변형에 따른 간섭 위상값을 구하는 방법으로 위상 이동 장치인 PZT(piezoelectric transducer)를 부착시킨 거울을 미세 이동시켜 물체 각 지점에서의 위상값을 구하는 방법이다. 간섭무늬는 그 자체가 변형에 대한 정보는 가지고 있으나 그것만으로는 변형의 요철 정보를 확인할 수 없기 때문에 정확한 변형량을 알기 위해서 화상 처리 시스템을 이용하여 변형의 정량화를 자동적으로 수행할 수 있도록 한 위상 이동법을 사용한다.

물체의 변형 전과 후에 물체에서 산란되어 나오는 파의 복소 진폭에 따른 빛의 세기는 관측면 xy 의 x, y 좌표에서 화소의 밝기(grey level)값 I 에 대해 다음과 같이 주어진다.

$$I_i(x, y) = I_0 \{1 + \gamma(x, y) \cos[\psi(x, y) + a_i]\} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

여기에서 우리가 얻어내고자 하는 것은 변형에 의한 간섭위상(interference phase) $\psi(x, y)$ 이다.

$\psi(x, y)$ 를 구하기 위해서 위상 이동법에서는 두 빔중 한 경로에 설치된 PZT를 부착시킨 거울을 $\pi/2$ 씩 위상 이동시켜서 식 (7)로 표현되는 상대적인 위상차를 지닌 Fig. 2의 4개의 간섭무늬 화상을 얻는다. 그리고 식 (7)의 식들을 조합하여 계산하면 식 (9)로 표현되는 변위의 크기와 부호를 알 수 있게 되는 위상도(phasemap)를 얻을 수 있게 되는데

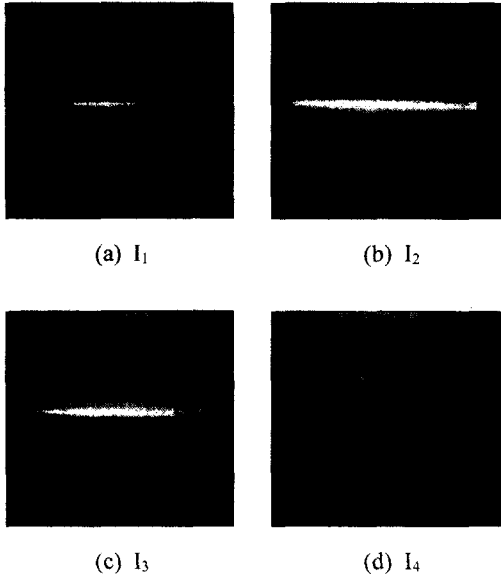


Fig. 2 Phase shifted images

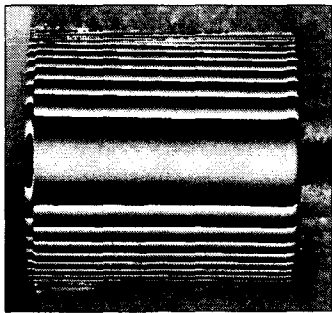


Fig. 3 Phasemap calculated from Fig. 2

이 위상도는 Fig. 3에 나타나있다. 이러한 기법을 4-프레임(4-frame) 위상 이동법이라 한다.

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= I_0(x, y) \{1 + \gamma(x, y) \cos[\phi(x, y)]\} \\
 I_2(x, y) &= I_0(x, y) \left\{1 + \gamma(x, y) \cos\left[\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}\right]\right\} \\
 I_3(x, y) &= I_0(x, y) \{1 + \gamma(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi]\} \\
 I_4(x, y) &= I_0(x, y) \left\{1 + \gamma(x, y) \cos\left[\phi(x, y) + \frac{3\pi}{2}\right]\right\}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) - I_2(x, y) &= 2I_0(x, y) \gamma(x, y) \sin \phi(x, y) \\
 I_1(x, y) - I_3(x, y) &= 2I_0(x, y) \gamma(x, y) \cos \phi(x, y)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right]
 \tag{9}$$

이렇게 하여 얻은 위상도는 아크 탄젠트 조합으로 이루어지기 때문에 2π 마다 불연속성을 지니게 되는 계단형 위상지도 형태로 나타나게 되며, 이 위상도만으로는 정량적인 정보를 추출할 수 없기 때문에 위상도 펼침(unwrapping)작업을 통하여 불연속적인 부분을 이어주어야 한다. 이 위상도 펼침 작업을 통하여 최종적으로 불체 표면에서 발생된 변위의 양을 얻을 수 있다.

4. 화상 증분 축적

화상 증분 축적(incremental addition image)법은 일정하게 조금씩 이동된 같은 변형을 가진 여러 개의 화상들을 증분하여 알고자 하는 커다란 최종적인 변형을 도출할 수 있고, 또한 간섭무늬의 질적 개선을 이룰 수 있는 기법이다.

전자 스펙클 패턴 간섭법을 이용하여 커다란 변형을 조사하고자 할 때 간섭무늬는 변형이 증가함에 따라 그 수가 많이 생성되고 그에 따른 비상관 효과(decorrelation effect)가 증가되어 간섭무늬의 가시도가 떨어지고 위상 정보가 소실되게 된다. 그러므로 측정하고자 하는 커다란 변형을 일정한 양씩 이동시켜 가면서 각각 축적된 정보를 더해가는 증분 화상 축적법을 이용하여 최종적인 변위를 도출해 냄과 동시에 간섭무늬의 비상관 효과를 줄이고 노이즈를 줄여 간섭무늬를 개선을 시킬 수 있다.

이 증분 화상 축적을 위해서는 확산빔(diffused beam)이 아닌 시준빔(collimated beam)을 사용하여야 한다. 확산빔은 스펙클 자체를 정보전달자로 하기 때문에 빔의 이동이 많아지게 되면 노이즈가 많아지고 비상관 효과가 발생되어 화상 증분 과정에서 간섭무늬의 불균일이 발생되어 측정하고자 하는 변형을 도출해 낼 수가 없다. 따라서 증분 화상 축적을 위해서는 시준된 빔 자체를 정보 전달자로 하는 시준빔을 사용하여야 한다. 또한 증분을 위한

Table 1 Relations between shift states, speckle-phase patterns(sets), and phase-deformation fringe patterns

Object beam	Sets (of four intensity patterns)	Phase-deformation fringe pattern
Undeformed	1	
1.shift step	2	1. corresponds to sets 1 and 2
2.shift step	3	2. corresponds to sets 2 and 3
.	.	.
i.shift step	i + 1	i th corresponds to i and i+1
.	.	.
N.shift step	N + 1	N th corresponds to sets N and N+1

화상은 같은 화상을 사용하게 되면 비상관 효과 없이 간섭무늬의 양적 증가를 얻을 수는 있으나 노이즈가 제거되지 못하여 질적 개선의 효과를 얻을 수 없게 됨을 실험을 통해 알 수 있었다. 따라서 일정한 양씩 계속 이동 또는 증가된 화상을 사용하여야만 한다는 것을 실험을 통하여 알 수가 있었다.

Table 1은 각각 마이크로 미터의 미소 이동에 의해 최종적인 변위를 도출하기 위한 각각의 이동 단계 설정현황을 보여준다. 먼저 조사빔이 $\Delta\theta$ 만큼 이동했을 때의 위상도를 얻고, 여기에서 같은 $\Delta\theta$ 만큼 또 이동했을 때의 위상도를 획득하여 첫 번째의 위상도에 증분을 시켜준다. 이 증분된 화상에 $\Delta\theta$ 만큼 또 이동한 위상도를 더하게 된다. 이러한 과정을 n번 반복함으로써 n $\Delta\theta$ 만큼 이동된 변위의 화상을 비상관 효과 없이 질적 개선과 함께 획득할 수 있게 된다.

5. 실험 구성 및 방법

Fig. 4는 형상 측정 및 화상 증분 측정 실험을 수행하기 위한 전자 스페클 간섭계와 화상 처리 시스템의 구성도이다.

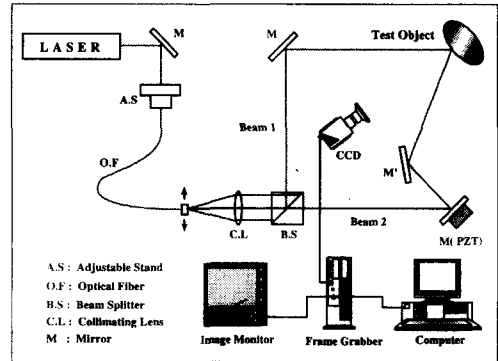


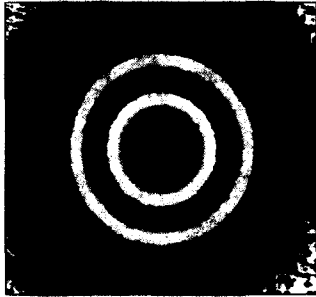
Fig. 4 Schematic diagram of speckle interferometer for dual-beam-shifted electronic speckle contouring

이 스페클 간섭계는 주변 진동의 영향을 줄이기 위해 1.5m× 3m의 방진 광학 테이블위에 설치되었다. 광원으로는 파장 532 nm의 연속 레이저인 Nd:YAG 레이저(100mW)를 사용하였고, CCD 카메라는 PULiX사의 TM-7EX를 사용하였다. 레이저 빔의 시준을 위한 렌즈는 직경 2인치, 초점 거리 11cm의 아크로메틱 렌즈를 사용하였다. 정량적 형상 정보 추출을 위한 4-프레임 위상 이동법을 수행하기 위해 두 물체빔 중 하나에 PZT를 부착하여 위상 이동을 수행하였다. 또한 레이저 빔의 이동을 간편화하기 위해 길이 5m, 직경 1.5mm, 460~700nm 파장 영역을 가진 단일 모드 광섬유(single mode optical fiber)를 사용하였다. 광섬유를 통과한 레이저 빔은 입구와 내부에서 일부 소실되어 입력 빔의 65%가 횡적 모드(TEM₀₀)형태로 출력된다. 광섬유를 통한 레이저 빔은 광 분할기에 의하여 2개의 물체빔으로 나뉘어 같은 각도로 물체에 조사하게 된다. 광섬유 자체가 확산자(expander)역할을 하기 때문에 광섬유를 통한 레이저 빔은 확산된 후 렌즈를 통하여 시준되고 미러를 통하여 물체에 조사된다. 두 빔의 조사각 θ 는 23.5° 이고 두 빔의 광경로는 $l_1 = l_2 = 141\text{ cm}$ 이다.

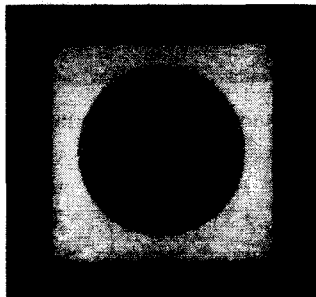
6. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서는 전자 스페클 간섭법에서 시준빔을 이용한 3차원 형상 측정과 간섭무늬의 양적증가와 질적개선을 위한 화상 증분 측적을 수행하였다.

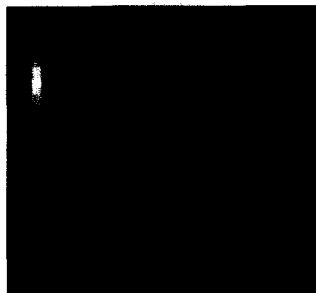
광섬유를 통해 확산된 레이저 빔은 렌즈에 의해 시준되며, 이 시준된 빔은 광섬유 아래 설치된 1축 방향 마이크로미터에 의해 좌우로 이동되게 된다. 그리고 이 이동량에 의하여 높이 등고선 간섭무늬를 형성시켜 형상을 측정하였다. 또한 화상 증분 축적은 한 방향으로 정해진 일정량만큼씩 미소 이동을 시켜 가면서 수행을 하였다.



(a) Phase map



(b) Demodulated image



(c) 3-D plot

Fig. 5 Results obtained when the illumination angle θ is 23.5° and the angel difference $\Delta\theta$ is 1.182 mrad.

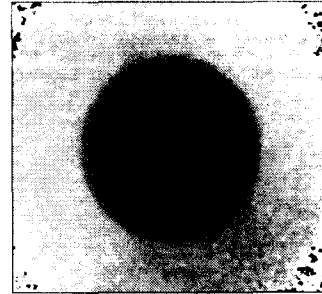


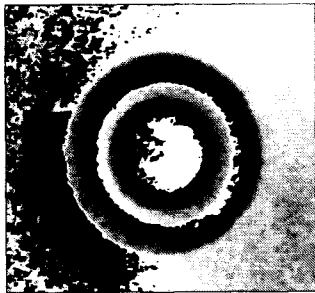
Fig. 6 phase maps obtained by shifting $100\ \mu\text{m}$

Fig. 5는 한 계단의 높이가 $200\ \mu\text{m}$ 이고, 넓이가 1mm 인 마이크로미터 단위의 시편에 대한 등고선 간섭무늬 획득 및 위상 이동법을 통한 3차원 형상 정보 추출과정의 결과이다. 마이크로미터에 의한 광섬유의 $130\ \mu\text{m}$ 이동에 의해서 변화된 각도 $\Delta\theta$ 가 1.182 mrad 일 때로서 등고선 간격은 $d = 0.563\text{mm}$ 이다. (a)는 Fig. 4의 M(PZT)에 부착된 PZT에 의해 정량적 해석을 위해 $\pi/2$ 씩 위상 이동되어진 변형전과 후의 각각 4개의 이미지를 받아 그 이미지들의 차를 조합하여 구한 등고선 간섭무늬의 위상도를 보여주고 있다. (b)는 위상도 펼침작업을 통해 얻은 위상 펼침도이고, (c)는 이 위상 펼침도의 3차원 가시화 결과를 보여준다.

Fig. 6는 화상 증분 축적을 수행하기 위해 $100\ \mu\text{m}$ 이동을 통해 얻은 위상도들 중의 하나이다. 이 위상도와 같은 $100\ \mu\text{m}$ 이동된 이미지를 마이크로미터를 이동시켜가면서 여러개의 위상도를 연속적으로 잡고 이것들을 계속해서 증분하면 얻고자 하는 최종 변위를 도출할 수가 있게 된다.

Fig. 7, 8은 화상 증분 축적 수행의 결과를 보여주는 그림이다. Fig. 7은 $100\ \mu\text{m}$ 씩 8번의 미소 이동을 통해 얻은 8개의 화상들을 증분시켜 얻은 간섭무늬의 위상도를 보여주는 결과로서 최종적인 이동량은 $800\ \mu\text{m}$ 이다. 그리고, Fig. 8은 $130\ \mu\text{m}$ 씩 6번의 미소 이동을 통해 얻은 6개의 화상들을 5번의 증분을 통해 얻은 위상도를 보여주는 결과로서, 최종적인 이동량은 $780\ \mu\text{m}$ 이다. 이 이동량은 화상 증분 축적이 아니고서는 간섭무늬의 비상관 효과(decorrelation effect)에 의해 제한되어지는 이동 변위량이다. 화상이 증분될수록 위상도의 간섭무늬는 변위량이 증가되기 때문에 간섭무늬의 수가 증가되

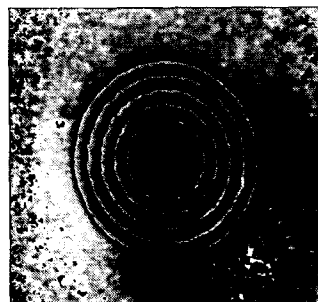
고, 또한 비상관 효과가 없음을 보이고 있다. 그리고 간섭무늬의 구불구불한 패턴은 노이즈를 나타내는 것인데, 화상이 증분될수록 구불구불한 패턴이 점차 없어지며 노이즈가 상당수 제거된 개선된 간섭무늬를 보여주고 있다.



(a) Incremental image by 2th addition

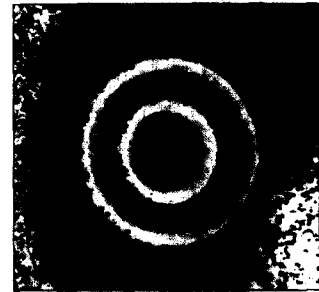


(b) Incremental image by 4th addition



(c) Incremental image by 7th addition

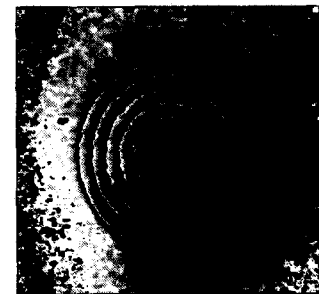
Fig. 7 Incremental addition images of phase maps obtained by shifting $100 \mu\text{m}$ each.



(a) Incremental image by 1th addition



(b) Incremental image by 3th addition



(c) Incremental image by 5th addition

Fig. 8 Incremental addition images of phase maps obtained by shifting $130 \mu\text{m}$ each.

7. 결론

본 연구에서는 시준빔을 이용한 3차원 물체의 형상측정을 수행하였고, 변형량의 제한을 극복하고, 간섭무늬의 양·질적 개선을 위해 화상 증분

축적법을 이용하였다.

화상 증분 축적에 의한 3차원 물체의 능고선 폭이 이론 계산식을 간섭계의 기하학적 해석을 바탕으로 하여 산출하였고, 시준빔을 이용한 간섭계의 성능 평가를 위해 계단형 시편을 이용하여 3차원 형상 측정을 수행하였다. 그리고 시준된 빔을 미소 이동시켜 가면서 얻은 화상들에 대해 증분을 수행하였고, 그를 통해 비상관 효과에 의해 제한되었던 변위량의 제한을 극복할 수 있었으며, 또한 간섭무늬의 양적 증가와 질적 개선을 이루었다.

본 연구에서는 화상 증분 축적법을 설명하였고, 가능성을 실험을 통해 입증하였다. 본 연구에서 사용한 화상 증분 축적법에 대해서, 차후에는 노이즈 제거에 의해 개선된 정확도 및 오차의 계산 등에 대한 연구를 수행할 예정이고, 그를 바탕으로 하여 변위 측정 실험 및 표면 조도 측정 등에 응용할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 과학기술부 · 한국과학재단 지정 지역 협력 연구센터인 전북대학교 메카트로닉스 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. R. Jones and C. Wykes, Holographic and Speckle Interferometry, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, pp. 165-196, 1989.
2. 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.
3. R. Rdriguez-Vera, D. Kerr and F. Mendoza-Santoyo, "Electronic Speckle Contouring," *Opt. Soc. Am.*, Vol. 9, pp. 2000-2008, 1992.
4. B. D. Bergquist and P. Montgomery, "Contouring by Electronic Speckle Pattern Interferometry," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, Vol. 599, pp. 185-195, 1985.
5. 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.
6. Kang, Young June and Kim, Gye Sung, "전자 스페클 패턴 간섭법을 이용한 형상측정에 관한 연구." *한국정밀공학회지*, Vol. 15, No. 10, pp. 156-164, 1998.
7. K. Creath, "Phase-Shifting Speckle Interferometry," *Appl. Opt.*, Vol. 24, pp. 3053-3058, 1985.
8. T. Floureux, "Improvement of Electronic Speckle Fringes by Addition of Incremental Images," *Opt. Laser Technol.*, Vol. 25, No. 4, pp. 255-258, 1993.
9. M. Hertwig, T. Flourcux and T. Flemming, "Application of Recently Improved Electronic Speckle Pattern Interferometry by Addition of Incremental Images," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, Vol. 2340, pp. 124-133, 1994.
10. M. Hertwig, "Application of Improved Speckle Contouring Technique to Surface Roughness Measurement," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 26, pp. 115-130, 1997.