

# 전자 스페클 간섭법에서의 이상적인 위상도 추출과 필터링 방법

강영준\*, 이주성\*\*, 박낙규\*\*\*, 권용기\*\*\*\*

## Ideal Phase map Extraction Method and Filtering of Electronic Speckle Pattern Interferometry

Young June Kang\*, Ju Sung Lee\*\*, Nak Kyu Park\*\*\* and Yong Ki Kwon\*\*\*\*

### ABSTRACT

Deformation phase can be obtained by using Least-Square Fitting. In extraction of phase values, Least-Square Fitting is superior to usual method such as 2, 3, 4-Bucket Algorithm. That can extract almost noise-free phase and retain  $2\pi$  discontinuities. But more fringes in phase map,  $2\pi$  discontinuities are destroyed when that are filtered and reconstruction of deformation is not reliable. So, we adapted Least-Square Fitting using an isotropic window in dense fringe. Using Sine/Cosine filter give us perfect  $2\pi$  discontinuities information. We showed the process and result of extraction of phase map and filtering in this paper.

**Key Words** : ESPI(전자 스페클 패턴 간섭법), Phase Shifting Method(위상이동법), Least Square Fitting(최소 자승법), Sine/Cosine Filter(싸인/코사인 필터)

### 1. 서론

1970년대에 전자 스페클 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)<sup>(1)</sup>가 처음 소개된 이후로, 비접촉이며 비교적 넓은 영역에 대해 실시간으로 수십 나노미터 단위의 정밀도를 가지고 측정할 수 있는 장점 때문에 ESPI는 광계측의 여러 분야에 널리 활용되고 있으며 현재는 진동모드의 측정 및 압력 용기의 내부크랙의 검출에도 응용되고 있다. 계측의 기본이 되는 위상정보의 획득은 주로 몇 개의 프레임을 사용하는 위상 이동방법<sup>(2)</sup>이 이용되고 있고 이들은 arctan함수를 이용해 위상을 얻으므로 modulo  $2\pi$  불연속성을 지니게 된다. 따라서 전체

적인 위상분포를 얻기 위해선 이러한  $2\pi$  불연속성을 제거하는 연속화(unwrapping) 과정을 거쳐야 한다<sup>(3)</sup>. 그러나 ESPI는 빛의 간섭을 이용하므로 스페클 특성상 많은 노이즈를 포함하게 되며 이들 노이즈는  $2\pi$  불연속성과 함께 위상도 내에서 높은 공간 주파수의 성격을 띠므로 간단한 필터링 등의 과정으로는 연속화(unwrapping)에 필요한 위상도(phase map)를 얻을 수가 없다. 특히, 위상도에서 간섭무늬(fringe)의 수가 적을 때는 보통의 위상이동 방법으로도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있으나 간섭무늬의 수가 많아지면  $2\pi$  불연속성의 위치가 모호해지며 연속화 이전에 필터링 과정에서 많은 정보 손실을 감수해야 하므로 오차를 많이 포함하게

\* 2001년 4월 12일 접수

\* 전북대학교 메카트로닉스 연구센터

\*\* 전북대학교 대학원 (현 삼성탈레스(주))

\*\*\* 전북대학교 대학원

\*\*\*\* 전주공업대학교 기계과

된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 두 가지 방법을 제시했다.

첫째, 최소자승법(Least-Square Fitting)을 이용하여 위상 추출에 필요한 프레임수를 줄여 PZT(Piezo Electronic Transducer)의 위상이동 따른 오차를 줄이고 인접 위상의 분포로부터 최적화된 위상을 계산하며 간섭무늬가 밀집된 지역에서도 간섭무늬의 형태에 따라 비등방향을 사용하여 간섭무늬가 많은 위상도의 연속화를 가능하게 했으며 둘째, 위상도의 필터링 과정에서  $2\pi$  불연속성을 가진  $\arctan$ 의 위상을 직접 필터링하지 않고  $\sin$  위상과  $\cos$  위상으로 분리해 연속적인 위상으로 만든 다음 필터링 작업을 수행하여  $2\pi$  불연속 정보를 최대한 보존하도록 하였다.

## 2. 변형 위상의 추출

측정하고자 하는 표면의 거칠기 정도, 즉 표면의 높이분포함수  $h(x, y)$ 와 위상  $\phi(x, y)$ 과의 관계는 식(1)과 같으며

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi(x, y) \quad (1)$$

물체의 변형으로 인하여 생기는 높이변화는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta h(x, y) &= h'(x, y) - h(x, y) \\ &= \frac{\lambda}{4\pi} (\phi'(x, y) - \phi(x, y)) \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 변형 전과 변형 후의 위상을 비교함으로써 변형량을 측정할 수가 있는데 ESPI에서 간섭무늬는 이러한 위상정보를 포함하게 된다.

간섭무늬 상의 한 점에서 빛의 강도와 그 점에서의 위상과의 관계는 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며

$$I(x, y) = I_o(x, y) + I_r(x, y) + 2\sqrt{I_o(x, y)I_r(x, y)} \cos(\phi(x, y)) \quad (3)$$

$I(x, y)$ 는 간섭무늬 상의 빛의 강도분포,  $I_o(x, y)$ ,  $I_r(x, y)$ 는 각각 물체빔과 기준빔의 빛의 강도,  $\cos(\phi(x, y))$ 는 대응하는 점에서의 피측

정 물체의 위상에 관한 코사인 값이다. 위 식 (3)에서  $I_o(x, y)$ ,  $I_r(x, y)$ ,  $\cos(\phi(x, y))$ 의 3개의 미지수를 포함하므로 직접적으로  $\phi(x, y)$ 를 계산할 수는 없다.<sup>(1,2)</sup> 따라서 간섭무늬를 형성하는 두 간섭광 사이에 위상변화를 주어 변화된 간섭무늬를 원래의 간섭무늬와 비교하여 위상차를 구할 수 있는 phase shifting method 방법을 사용한다.

이러한 방법은 얻는 영상의 수에 따라 3-bucket, 4-bucket, 5-bucket 알고리즘<sup>(4,5,6)</sup>과 그리고 변형 전과 변형 후의 영상을 한번에 계산해서 변형위상만을 추출하는 2-bucket 알고리즘<sup>(7)</sup>이 있다.

그러나 본 연구에서는 ESPI가 외부환경에 민감해서 노이즈를 많이 가지고 있기 때문에 영상의 획득과정 중에 그러한 노이즈로 인한 계산오차를 줄일 수 있는 2-bucket 알고리즘과 최소자승법을 조합한 방법을 구현하였다<sup>(8,9)</sup>.

### 2.1 2-Bucket 알고리즘과 최소자승법

2-bucket 알고리즘은 다른 방법과는 달리 변형 전과 변형 후의 영상을 모두 이용해서 계산하는 방식이다. 이 알고리즘은 PZT를 사용하여 얻는 영상이 3-bucket, 4-bucket, 5-bucket 알고리즘에 비해 상대적으로 적기 때문에 영상을 얻을 때 PZT의 비선형 예러, 공기와의류, 시간이 지남에 따라 decorrelation으로부터 발생하는 오차를 줄일 수 있고 보다 빠른 계산을 가능하게 한다. 위상 이동량

은  $\frac{\pi}{2}$ 이며 그 때의 간섭무늬 분포는 식 (3)에 배경강도  $I_b$ 와 모듈레이션  $I_m$ 을 사용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= I_b + I_m \cos \phi \\ I_2(x, y) &= I_b + I_m \cos(\phi + \frac{\pi}{2}) \\ I_3(x, y) &= I_b + I_m \cos(\phi + \phi + \frac{\pi}{2}) \\ I_4(x, y) &= I_b + I_m \cos(\phi + \phi + \pi) \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)를 위상에 관하여 정리하면 위상에 관한 식(5)를 구할 수 있다.

$$\Psi(x, y) = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{I_2 - I_3}{I_1 - I_4} \right] \quad (5)$$

그러나 식(5)를 이용해서 얻은 변형 위상에도 노이즈가 포함되어 있다. 왜냐하면 위상 이동수를 줄여 PZT의 비선형 에러와 공기 유동에 의한 에러를 줄였다고는 하나 완전히 제거 할 수는 없기 때문이며 또한 ESPI의 스펙클 특성에 기인하는 스펙클 노이즈와 양자화 노이즈, 전기적 노이즈 등도 위상도의 오차에 포함되기 때문이다. 따라서 여기에 최소자승법을 이용해서 강도차들의 분포를 통해 각각의 위상값을 계산하면 계산 중에 노이즈 요소를 고려해 최적의 위상값을 계산하므로 노이즈를 줄일 수 있다.

식(5)에서  $\arctan$  함수의 분자와 분모를 각각  $x$ ,  $y$ 라 하고 이에 대해 정리하면 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= I_1 - I_4 = 2I_m \cos(\psi + \frac{\Psi}{2}) \cos(\frac{\Psi}{2}) \\ y &= I_2 - I_3 = 2I_m \cos(\psi + \frac{\Psi}{2}) \sin(\frac{\Psi}{2}) \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 1은 2-bucket 알고리즘을 적용하여 구한 위상도에서 임의의  $m \times m$  window 내의 픽셀들을 샘플링하여  $x$ 와  $y$ 에 대해 도식한 것인데  $x$ 와  $y$ 에 대응하는 점들의 분포는  $\arctan$  함수의 인수이므로 Fig. 1에 나타난 점들의 분포가 선형적으로 밀집되어 나타날 때  $\arctan$  함수의 결과값으로 나타나는 위상도에서는 오차가 적은 간섭무늬를 나타내게 되는 것이다. 하지만 변형과 다른 노이즈의 요소로 인하여 이러한 점들의 분포는 원점으로부터 멀어지게 되며 최적선(best-fit line)을 중심으로 좌우로 멀리 분포하는 양상을 나타내게 된다. 이때의 원의 반경과 중심선으로부터의 거리는 변형과 노이즈에 비례한다. 따라서 넓게 분포된 점들을 가로지르는 최적선(best-fit line)을 긋고 최적선에 분포된 점들을 fitting시키면 최소자승법 알고리즘 내의 정의된 윈도우 사이즈 내의 픽셀들은 오차가 감소한 일정한 위상값을 갖게 되는 것이다. 여기서 각  $\varphi$ 은 샘플링된 window내의 평균위상과 비례한다. 그 최적선의 기준은 원점으로부터 점들까지의 거리의 제곱의 합이 최소가 되는 것으로

$$\sum (\varphi) = \sum_{k,l} (x_{k,l}^2 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + y_{k,l}^2 \cos^2 \varphi) \quad (7)$$

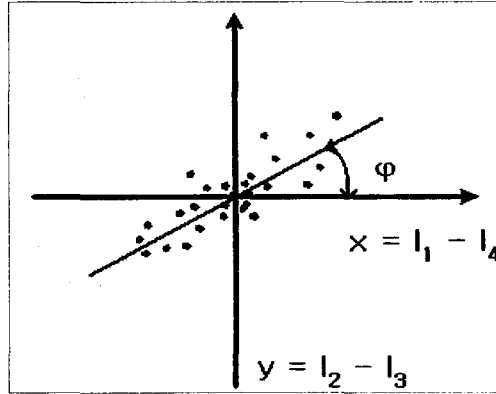


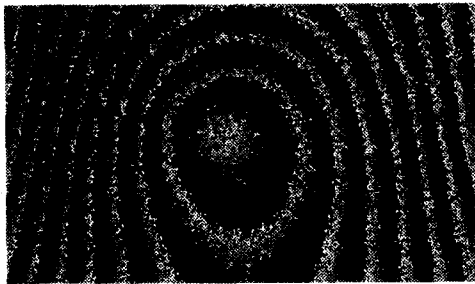
Fig. 1 Phase distribution

과 같고, 식(7)에서  $\sum$ 의 미분이 zero가 되어야 하며 그 각  $2\varphi_{\min}$ 을 창의 중심 픽셀에 넣으면 그 변형 위상은 식(8)과 같이 얻을 수 있다.

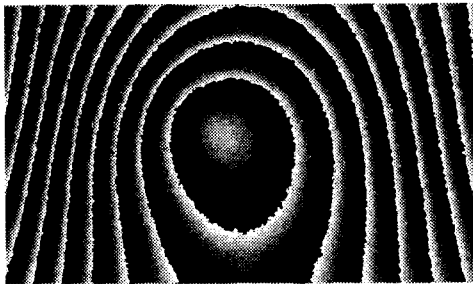
$$\psi = \tan^{-1} \left[ \frac{2 \sum_{k,l} (x_{k,l} y_{k,l})}{\sum_{k,l} (x_{k,l}^2 - y_{k,l}^2)} \right] \quad (8)$$

Fig. 2와 Fig. 3은 금속 평판의 면외변위를 ESPI로 측정된 것<sup>(10)</sup>이며 ESPI를 이용한 변위측정 시 사용되는 일반적인 실험장치는 참고논문 (10)을 참조하기 바란다. Fig. 2(a)처럼 PZT의 2차 에러가 없어진 2-bucket 알고리즘에서의 위상도에는 각 간섭무늬의 경계부분이 선명하지 않고 위상도의 전역에 오차로서 발생하는 흰 점들이 고루 분포되어 있는 등의 많은 오차가 포함되어 있으나 여기에 최소자승법을 도입한 Fig. 2(b)에는 Fig. 2(a)에 비해 상대적으로 노이즈가 없는 깨끗한 위상도를 얻을 수 있다. 또한 Fig. 2(c)처럼 최소자승법 알고리즘 내의 정의된 윈도우의 크기가 커질수록 위상도의 필터링 효과가 커짐을 알 수 있다.

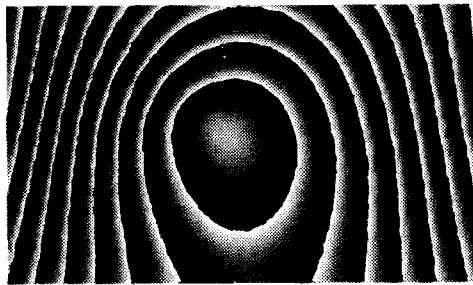
하지만 간섭무늬의 수가 Fig. 3(a)처럼 많아지면 최소자승법으로도 정확한 위상의 계산이 어렵게 된다. 이러한 위상도는 연속화(unwrapping) 시에 부정확한  $2\pi$  불연속 정보로 인하여 많은 오차를 포함하게 되는데 여기에 정방형의 윈도우가 아닌 비등



(a) 2-Bucket



(b) 5x5 Least-square fit



(c) 9x9 Least-square fit

Fig. 2 Phase map example (I)

방 창을 사용함으로써 Fig. 3(b)처럼 해결할 수 있다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)에 비해 각 간섭무늬의 경계 부분이 거칠지 않고 매끄러운 곡선을 이루고 있으며 또한 간섭무늬가 조밀한 지역의 간섭무늬에서는 이웃하는 픽셀값과 큰 차이가 나는 등의 단락없이 선형적으로 고루 분포된 것을 볼 수 있다. 이러한 특징은 Fig. 2에서도 마찬가지로, ESPI에서는 위상도를 연속화작업을 거쳐 최종적으로 3-D plot을 수행하게 되는데 이러한 과정을 거치면서 나타날 수 있는 오차의 요소를 감소시킨 것이라 할 수 있다.

왜냐하면 연속화 과정은 Fig. 4와 같은 라인 프로파일에서 한 개의 톱니모양의 가장 낮은 값과 이웃하는 톱니부분의 가장 높은 값을 이어주면 각 각의 톱니파는  $2\pi$ 마다 끊기지 않고 모두 연결되어 한 개의 포물선을 이루게 하고 이를 위상도의 모든 영역에 대해 수행하는 작업이다. 이 때 만약, 각 간섭무늬의 경계부분이 거친 곡선을 나타낸다면 각 직선은 Fig. 4와 같이 뚜렷한 톱니 모양이 연속된 분포를 나타내지 않을 뿐 만 아니라 이를 연속화 과정을 수행했을 때는 완만한 형태의 포물선을 얻을 수 없게 된다. 다시 말해, 이러한 연속화 과정을 수행하여 얻은 위상펼침도(unwrapping map)는 오차가 포함된 불완전한 포물선들이 조합된 것이기 때문이다. 따라서 Fig. 3(b)에서와 같이 최소자승법을 적용할 때 비등방창의 형태는 간섭무늬의 형태에 따라 결정되어야 한다.

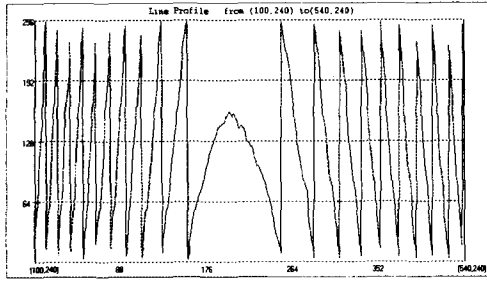


(a) 5x5 Isotropic window

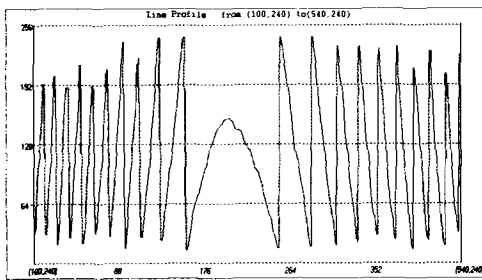


(b) 3x11 Anisotropic window

Fig. 3 Phase map example (II)



(a) Raw phase map



(b) Filtered phase map

Fig. 4 Line profile

## 2.2 Sine, Cosine 필터

위상도에서 노이즈와  $2\pi$  불연속 정보는 일반적으로 높은 공간주파수 특성을 갖는다. 따라서 평균필터나 메디안 필터를 사용하는 것은 노이즈를 줄일 수 있지만 간섭무늬의 경계부분에서 선명하고 날카로운 형태를 지니는  $2\pi$  불연속 정보도 함께 잃게 하는 효과를 나타낸다. 왜냐하면 평균필터나 메디안 필터는 필터 내의 정의된 알고리즘에 의하여 픽셀값들을 평균화하거나 중간화하여 지정된 원도의 안의 모든 픽셀값을 계산된 한 개의 값으로 나타내기 때문이다.  $\pi$ -Shifting 필터 또한 내부적으로 메디안 필터를 사용하므로  $2\pi$  불연속 정보에 오차를 포함하게 된다. Fig. 4는 2-bucket 위상이동 알고리즘과 최소자승법을 적용하여 얻은 위상도와 이를 필터링하여 얻은 위상도의 라인 프로파일을 보여주고 있다. 가로축은 간섭무늬에서 추출된 선의 가로길이에 대응하며 세로축은 각 점에서의 픽셀값을 나타낸다. 원래의 위상도와는 달리 필터링이 되

면 톱니파의 끝 부분이 뾰족해지고 각 간섭무늬의 경계를 나타내는 톱니 부분의 가장 낮은 픽셀값들이 0값에 근접하지 않으며 또한 그 값들이 일정하지 않게 나타나는 등의 원래의 위상도에서 변형되어 정보를 소실하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 간섭무늬의 수가 많아질 수록 두드러진다.

따라서 톱니파의 모양을 갖는 위상도를 필터링하지 않고 위상도를 sine과 cosine의 위상으로 분리하면 연속적인 위상이 되는데 그 각각의 위상을 필터링하면  $2\pi$  불연속정보의 소실이 훨씬 줄어들게 된다. 그러한 과정을 Fig. 5에 나타내었고 Fig. 6에 원래의 위상과 arctan의 위상을 분리한 sine과 cosine의 위상을 보여주고 있다.

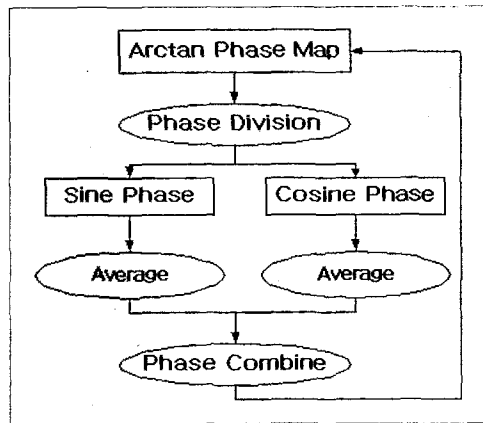
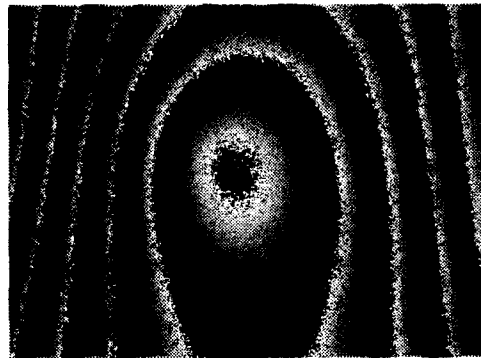
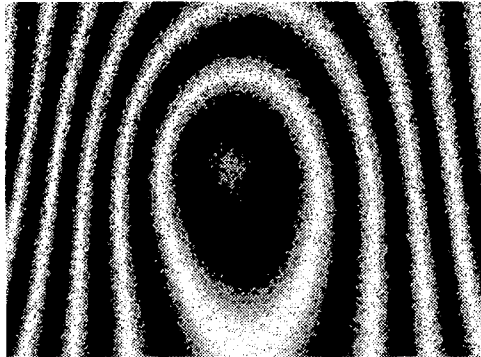


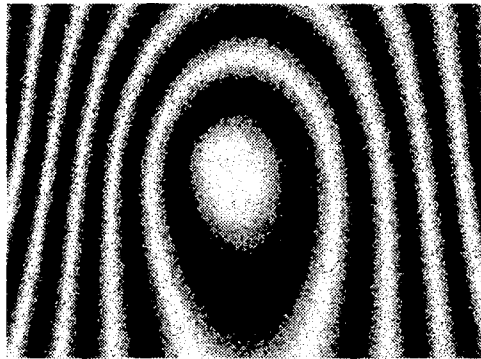
Fig. 5 Sine/Cosine filtering flow chart



(a) Raw phase map



(b) Sine phase



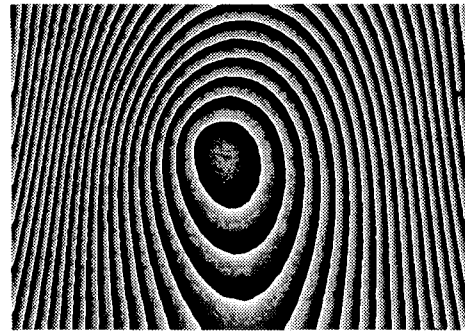
(c) Cosine phase

Fig. 6 Raw and sine/cosine phase

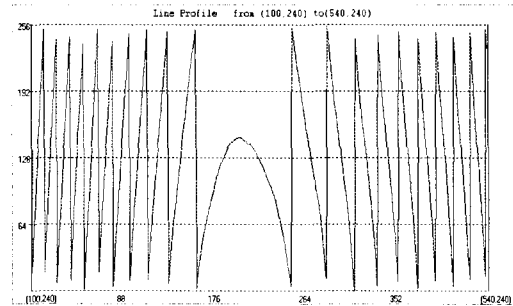
sine과 cosine의 위상을 필터링할 때는 평균필터나 메디안 필터를 사용하였는데 실험 결과 평균 필터가 더 양호한 결과를 보여 주었으며 간섭무늬 간격이 좁을 수록 필터 커널(kernel)이 작은 것을 사용해야 한다. 필터링된 sine과 cosine의 위상을 이용해  $\arctan$ 의 위상으로 바꾸면 필터링된 위상도를 얻을 수 있으며 이러한 과정을 여러 번 반복하면 노이즈가 대부분 제거 될 뿐 아니라  $2\pi$  불연속정보를 거의 이상적인 형태로 지니는 위상도를 얻을 수 있다<sup>(10)</sup>.

Fig. 7은 3x11의 비등방장을 사용하여 얻은 위상도에 sine/cosine 필터를 적용한 위상도와 그의 라인 프로파일이 Fig. 7에 나타나 있는데 2-bucket 알고리즘을 사용하여 얻은 위상도 Fig. 2(a)나

2-bucket 알고리즘에 등방창과 비등방창의 최소자승법 알고리즘만을 적용한 Fig. 3과 비교하여 보면 각 간섭무늬의 경계가 날카롭고 매끄럽게 이어져 있을 뿐만 아니라 이를 라인 프로파일 했을 때 Fig. 2(b)와 같이  $2\pi$  불연속 정보가 이상적인 형태를 보이고 있음을 알 수 있다.



(a) Filtered phase map



(b) Line profile

Fig. 7 Filtered phase map using sine/cosine filter and line profile

### 3. 결론

본 연구에서 수행한 결과는 다음과 같이 요약할 수가 있다.

위상이동여러, 공기와의류, 진동, 비정적 레이저 출력 등의 원천적인 오차요소를 갖는 ESPI에서 프레임 수를 줄이고 최소자승법을 적용하여 거의 노이즈가 없는 위상도를 얻을 수 있으며 간섭무늬가

밀집한 지역에서 간섭무늬 형태에 따라 비등방 창을 사용함으로써 측정의 폭을 넓혔으며 sine/cosine 필터를 같이 사용함으로써 원래의  $2\pi$  불연속 정보를 소실시키지 않아 연속화 시에 발생될 수 있는 에러를 줄였다. ESPI는 변형 및 진동양상의 결과로 나타나는 간섭무늬(fringe pattern)를 전자적으로 처리하고 해석하는 방법이므로 노이즈가 없는 위상도(phase map)를 얻는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서 제시한 이상적인 위상도 추출과 필터링 방법은 현재 ESPI가 응용되고 있는 압력용기나 파이프의 내부크랙 검출, 진동하는 물체의 진동모드 계측 및 크랙 진전 길이 측정 등의 여러 가지 분야에 활용될 수 있으며 또한 그 성과가 클 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. A.E. Ennos, "Speckle Interferometry," in : J.C.Dainty(Ed), Laser Speckle and Related Phenomena, Springer, Berlin, pp. 203-253, 1984.
2. K. Creath, "Phase Shifting Speckle Interferometry," Appl. Opt, Vol. 24, pp. 3053-3058, 1985.
3. E.Vikhagen, "Non Destructive Testing by use TV-Holography and deformation phase gradient calculation," Appl. Opt, 29, 137, 1990.
4. D.W. Robinson and D.C. Williams "Digital Phase Stepping Speckle Interferometry," Opt.Comm 57, 26, 1986.
5. Katherine Creath, "Phase-Shifting Speckle Interferometry," Appl. Opt, 24(18), 3053, 1985.
6. P. Hariharan, "Digital Phase-Stepping Interferometry : A Simple Error-Compensating Phase Calculation Algorithm," Appl. Opt. 22, 2054, 1987a.
7. Meinhard Sesselmann et al, "Single phase-step algorithm for phase difference measurement using ESPI," SPIE, Vol. 3478, pp. 153-159, 1998.
8. Meinhard Sesselmann et al, "Single phase-step algorithm for phase difference measurement using ESPI," SPIE, Vol. 3478, pp. 153-159, 1998.
9. Chung K.H et al, "Least-squares fitting of the phase map obtained in phase shifting electronic speckle pattern interferometry," Opt. Soc. Am 931, 1994.
10. 강영준, 최장섭, "Measurement of Vibration Mode Shates Using Time Average ESPI," 한국 정밀공학 회지, 제13권, 제2호, pp. 89, 1996.