

반점 간섭무늬 위상단면도의 잡음제거

조재완 · 홍석경 · 백성훈 · 김철중

한국원자력연구소 레이저가공 및 광계측팀

(1994년 5월 6일 받음)

반점 간섭무늬 위상단면도의 잡음을 제거하기 위해 위상이동 convolution과 2-bit 양자화 스무딩 필터를 조합하였다. 위상이동 convolution처리로 톱니파 형태를 갖는 반점 간섭무늬 위상단면도에서 2π jump 양단의 edge 성분을 완벽하게 유지하면서 스무딩 처리를 할 수 있었다. 2-bit 양자화 스무딩 필터는 반점 간섭무늬 위상단면도의 스무딩 처리를 하는데 있어서 average, low-pass 필터 및 median 필터 보다 처리속도가 빠르고 S/N비 특성이 우수하였다. 잡음을 제거한 반점 위상단면도를 path dependent unwrapping 알고리즘을 적용하여 위상의 2π 불연속성을 해소하고 펼쳐 보았다.

I. 서 론

홀로그래피 간섭계(Holography Interferometer; HI)나 레이저 반점 간섭계(Laser Speckle Interferometer; LSI)는 광학적인 비접촉 방법으로 μm 정도 크기의 미세면형 측정이 가능한 특성 때문에 정밀계측분야에 널리 활용되고 있다.^[1] 최근에는 번거로운 화학적 처리과정을 수반하는 감광판(photographic plate) 대신에 CCD 카메라와 영상처리시스템을 결합한 전자반점 간섭계(ESPI: Electronic Speckle Pattern Interferometer)나 전자반점 전단간섭계(Electronic Speckle Shearography) 등이 각광을 받고 있다.^[2] HI, ESPI 및 전자반점 전단간섭계에서 반점은 간섭무늬의 형성이 이루어지도록하는 정보전달자이다. 그러나 간섭무늬가 형성된 뒤의 간섭무늬 패턴(interferogram)에서 반점은 저주파성분의 간섭무늬 위에 나타나는 고주파성분의 잡음이 된다. 특히, 전자반점 간섭계에 의한 간섭무늬는 홀로그래피 간섭계에 의한 간섭무늬에 비해 잡음에 의한 간섭무늬 선명도 저하가 심하다. HI나 ESPI에서 얻은 간섭무늬를 고전적인 간섭무늬 추적방법을 이용하여 해석하고자 할 때 HI에서는 어느정도 가능하지만 ESPI에서는 거의 불가능하다.^[3,4] 그래서 근래에 들어서는 전산해석의 용이성에서 우수한 장점이 있는 위상이동(phase shifting)법을 많이 사용하고 있다. 위상이동방법에 의해 얻어지는 간섭무늬의 톱니모양 위상단면도(sawtooth phasemap)에서는 상당부분의 반점 잡음을 줄이는 효과를 얻게 된다.^[5,6] 특히, 홀로그

래피 간섭계에서 위상이동방법을 이용해서 얻은 간섭무늬 위상단면도는 반점 성분의 고주파 잡음이 대부분 제거된다. 그러므로 물체의 구조상 주사(scan) 경로의 끊어짐이 없는 경우에는 1차원적인 path dependent unwrapping 알고리즘에 의해서도 unwrapping이 가능하다. 그러나 ESPI와 같은 반점 간섭계로 얻은 간섭무늬의 위상단면도에서는 고주파 성분의 반점 잡음에 의해 2π 불연속 지점에서 edge 성분의 구분이 용이하지 않다. 반점 간섭무늬 위상단면도를 해석하여 변형에 대한 정보를 추출하기 위하여 간섭무늬의 2π 불연속 지점의 edge 성분을 훼손하지 않고, 반점 잡음성분을 제거할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 반점 간섭무늬의 2π 불연속 지점의 edge 성분을 유지하면서 반점 잡음 제거를 위하여 위상이동(phase shift) convolution 알고리즘^[7]과 2 bit 양자화 스무딩 필터^[8]를 조합하였다. 이 결과를 1차원적인 path dependent unwrapping 알고리즘을 이용하여 펼쳐 보았다. 위상단면도를 얻는데 사용되는 위상이동방법에 의한 PZT 오차와 각각의 방법에 대한 특성 및 unwrapping 방법 등은 논외로 하고자 한다.

II. 반점 간섭무늬 위상단면도의 처리

1. 실험 장치구성

그림 1은 기본적인 ESPI 시스템을 나타내고 있다. 광원으로 5mW He-Ne 레이저를 사용하였으며 레이저

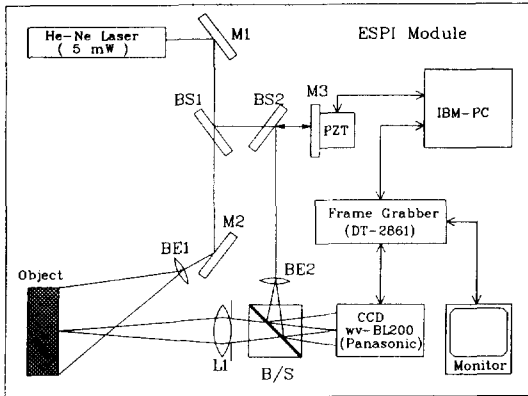


그림 1. ESPI 간섭계 모듈.

빔을 beam expander를 통해 목표물에 조사한다. 목표물의 이미지를 CCD 카메라로 잡아서 IBM-PC로 처리하며, CCD 영상은 DT-2861 frame-grabber로 처리한다. CCD 영상면에 맺히는 빔의 세기는 $I(x, y)$ 로 나타낼 수 있으며, (x, y) 좌표계는 화소 위치에 대응한다.

2. 위상이동방법에 의한 반점 간섭무늬 위상단면도 획득

물체의 변형에 대한 반점 간섭무늬 위상단면도는 변형전과 변형후의 위상단면도에 대한 감산처리를 통하여 얻는다. 각 화소에서의 빔의 세기는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$I_n(x, y) = I_o(x, y) + I_a(x, y)\cos(\phi(x, y) + \phi_{rn})$$

$I_o(x, y)$: pixel background intensity
 $I_a(x, y)$: pixel modulation amplitude
 $\phi(x, y)$: interference phase(간섭에 의한 위상)
 ϕ_{rn} : reference phase(참조 위상)

PZT 부착 거울을 이용하여 간섭계의 참조빔의 경로를 $\pi/2$ 간격으로 4번 이동시켜 각 화소에 대한 빔의 세기에 관한 식 $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$, $I_3(x, y)$ 및 $I_4(x, y)$ 등을 4개 얻는다. 4개의 연립방정식을 풀면 각 포인트에서 산란되는 빔의 위상단면도는 식 (2)와 같다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{(I_2 - I_4)}{(I_1 - I_3)} \quad (2)$$

변형전과 변형후의 물체표면에 대한 반점 포인트들에 대한 위상단면도를 구한후 변형전 위상단면도 $\phi_1(x, y)$ 과 변형후의 위상단면도 $\phi_2(x, y)$ 를 감산하면 \tan^{-1} 특성에

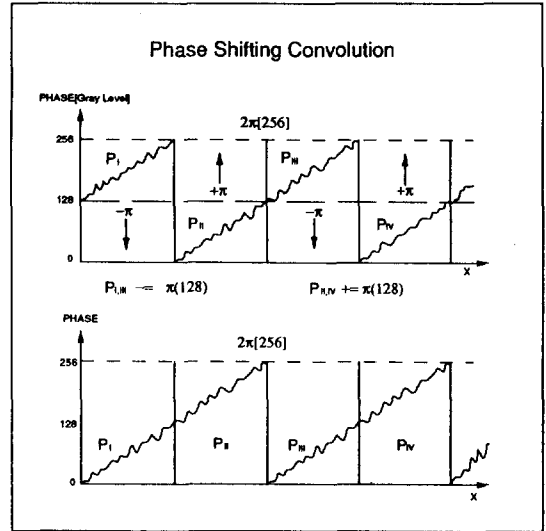


그림 2. 위상 이동 알고리즘.

의해 $-\pi \sim +\pi$ 의 범위를 가지며 2π 불연속성을 지닌 톱니(saw-tooth) 프로파일을 갖는 반점 간섭무늬 위상단면도를 얻을 수 있다.

3. 반점 간섭무늬 위상단면도의 잡음제거

계산하여 얻은 반점 간섭무늬 위상단면도는 CCD 카메라의 전자잡음 및 frame grabber의 양자화 잡음으로 인한 오차성분 및 부정확한 데이터를 갖고 있다. 반점 간섭무늬 위상단면도를 직접 스무딩해 버리면 톱니파 형태의 간섭무늬가 2π 마다 jump하는 부분에서의 정보를 잃어버린다. 2π jump 양단의 톱니파형태가 스무딩되어 버리므로 이를 펼침(unwrapping)으로서 신뢰성 있는 위상 정보를 얻을 수 없으며, 이러한 전체적인 위상정보를 토대로 한 정량적인 해석이 불가능하다. 신뢰성 있는 전체적인 위상정보를 추출하기 위해서 2π jump 양단의 위상정보를 가지면서 잡음을 제거하는 방법으로 노르웨이의 Vikhagen^[7]은 위상이동(phase shift) 알고리즘을 이용하였다. 그림 2에 Vikhagen이 사용한 위상 이동 알고리즘의 개념을 나타내고 있다.

그림 2에서 반점 간섭무늬 위상단면도의 2π 에 해당하는 그레이 레벨이 255이다. 반점 간섭무늬 위상단면도의 프로파일이 $\pi(128)$ 보다 크면 π 를 감하고 π 보다 적은 프로파일영역은 π 를 더해준다. 그러면 전체적인 간섭무늬가 π 만큼 이동된 효과를 나타낸다. 그림 3에 위상이동 알고리즘을 이용한 반점 간섭무늬 위상단면도의 잡음 제거 순서도를 나타내고 있다.

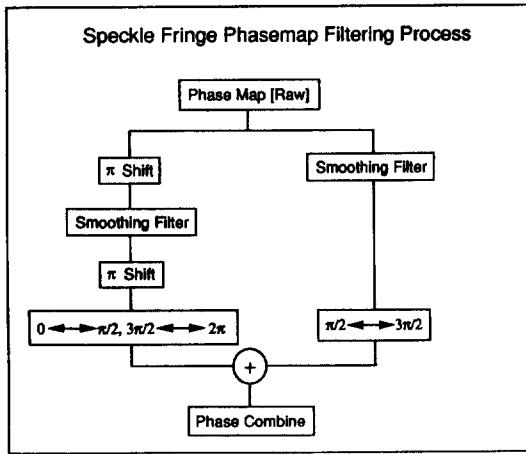


그림 3. 반점 간섭무늬 위상단면도의 잡음제거 순서도.

그림 3의 좌측에서, π 이동→스무딩→ π 이동의 흐름을 거치면 $0-\pi/2$, $3/2\pi-2\pi$ 영역의 데이터인 edge 성분이 강조되고 $\pi/2-3\pi/2$ 영역에서 convolution 오차를 갖는다. 그림 3의 우측처리는 반점 간섭무늬 위상단면도→스무딩 처리로 좌측처리과정과 반대로 $\pi/2-3\pi/2$ 영역의 데이터가 유지되고, $0-\pi/2$, $3/2\pi-2\pi$ 영역에서 convolution 오차를 갖는다. 그림 3의 좌/우측 처리에서 발생한 convolution 오차 영역을 상호 배제하면서 위상을 합성하면 edge를 유지하면서 고주파 성분의 반점 잡음이 제거된 톱니파 형태의 반점 간섭무늬 위상단면도를 얻을 수 있다. 그림 3의 좌/우측 처리결과를 그림 4, 5에 각각 나타내었다.

Vikhagen의 방식에서는 스무딩 필터로 low pass 필터나 median 필터를 사용하고 있다. 본 연구에서 테스트를 해본 결과 median 필터를 사용하는 것이 low pass 필터보다 S/N비 특성이 우수하였으며 필터의 window 크기는 5×5 이상이였다. 메디안 필터는 window 크기가 증가하면 처리시간이 매우 길어진다. 스무딩처리를 위한 계산시간을 단축하기 위하여 본 논문에서는 Petersen^[8]의 2 bit 양자화 스무딩 필터를 도입하여 처리시간을 단축하였다. 그림 6에 2 bit 양자화 스무딩 필터의 개념을 나타내었다.

2 bit 양자화 스무딩필터는 임의의 창 $V \times V$ 를 설정하여 창내에 있는 화소값들을 2비트, 4그룹으로 양자화하면 임의의 창 $V \times V$ 내의 화소값 $P[I, J]$ 는 다음과 같은 4그룹 중의 한 그룹에 속한다. 여기서, I, II, III 및 IV 그룹의 변수를 각각 $M1, M2,$

$$M1: 0 [0] \leq P[I, J] < \pi/2 [64]$$

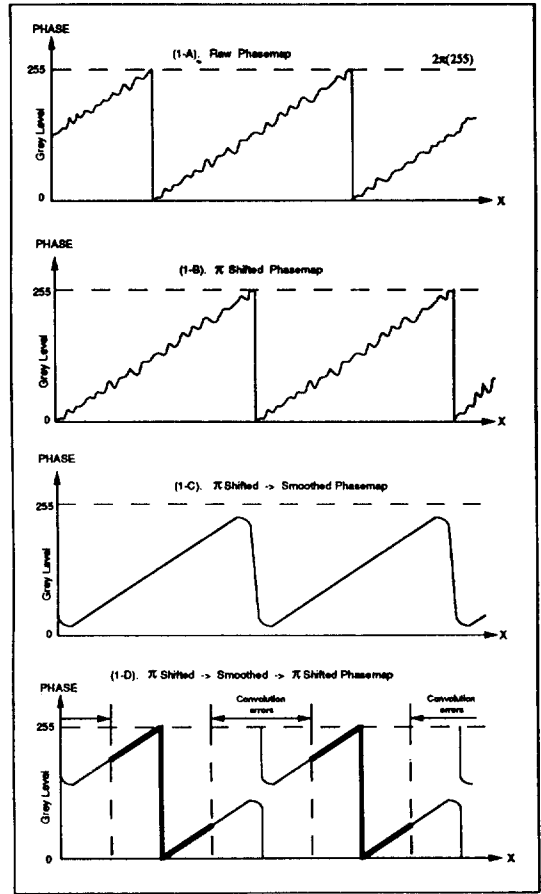


그림 4. π 이동→스무딩→ π 이동 처리.

$$M2: \pi/2 [64] \leq P[I, J] < \pi [128]$$

$$M3: \pi [128] \leq P[I, J] < 3\pi/2 [192]$$

$$M4: 3\pi/2 [192] \leq P[I, J] < 2\pi [256]$$

$M3$ 및 $M4$ 로 하고, 각각의 양자화 그룹의 갯수로 정의한다. 이들을 더하면 임의의 $V \times V$ 창의 총 화소수가 된다. 이를 식 (3)에 나타내었다.

$$M1 + M2 + M3 + M4 = V^2 \tag{3}$$

Petersen의 2비트 양자화 스무딩 알고리즘은 $V \times V$ 창 양자화 그룹의 이웃하는 그룹을 상호 배제하면서 $M1$ 과 $M3$, 그리고 $M2$ 와 $M4$ 를 상호비교하여 $M1, M2, M3$ 및 $M4$ 중에서 값이 가장 큰 2그룹을 지배그룹(dominant group)으로 정의한다. 즉, 임의의 창 $V \times V$ 의 중앙 화소값을 지배적인 2그룹의 적절함값으로 대체한다. 각각의 2지배 그룹에 대한 창 $V \times V$ 의 중앙화소를 대체하는 관계를 식 (4-1)~(4-5)에 나타내었다.

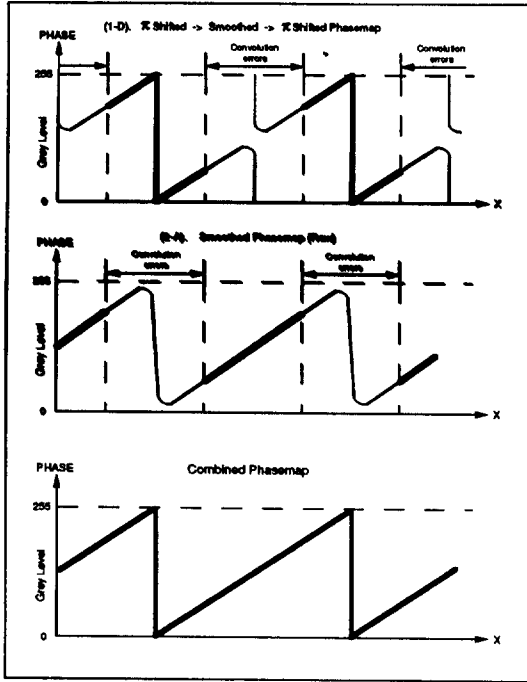


그림 5. π 이동→스무딩→ π 이동과 스무딩 처리의 합성.

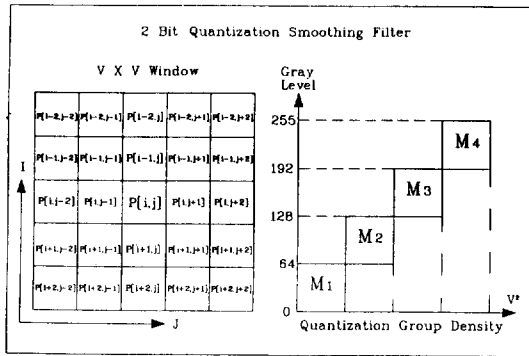


그림 6. 2 bit 양자화 스무딩 필터

$M1, M2$ dominant:

$$\phi = \pi/2 + \frac{M2 - M1 + 3(M3 - M4)}{4V^2} \pi \quad (4-1)$$

$M2, M3$ dominant:

$$\phi = \pi + \frac{M3 - M2 + 3(M4 - M1)}{4V^2} \pi \quad (4-2)$$

$M3, M4$ dominant:

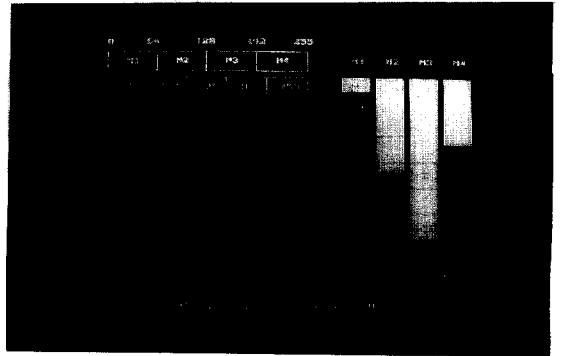


사진 1. 2 bit 양자화 스무딩 과정

$$\phi = 3\pi/2 + \frac{M4 - M3 + 3(M1 - M2)}{4V^2} \pi \quad (4-3)$$

$M1, M4$ dominant & $M1 + 3M2 > M4 + 3M3$:

$$\phi = \frac{M1 - M4 + 3(M2 - M3)}{4V^2} \pi \quad (4-4)$$

$M1, M4$ dominant & $M4 + 3M3 > M1 + 3M2$:

$$\phi = 2\pi + \frac{M1 - M4 + 3(M2 - M3)}{4V^2} \pi \quad (4-5)$$

이를 테면, $M1, M2$ 가 2지배그룹에 속한다면, $M1(0 \sim 63), M2(64 \sim 127)$ 의 중간값인 $\pi/2(64)$ 를 기준값으로 한다. 그리고, 2지배그룹과 나머지 2그룹($M3, M4$)의 값의 편차를 1:3의 비율로 해서 offset을 구한다. 즉, 2지배그룹의 중간값에 offset을 더한값을 임의의 창 $V \times V$ 의 중앙화소값으로 대체한다. Offset은 계산할때 2지배그룹의 편차와 나머지그룹의 편차의 비를 1:3으로 한 것은 상호 이웃하는 그룹을 배제하여 비교하므로, 즉, $M1$ 과 $M3$ 그리고 $M2$ 와 $M4$ 그룹의 그레이 레벨비를 1:3으로 간주할 수 있다고 사료된다. Petersen의 알고리즘을 구현한 것을 사진 1에 나타내었다. 사진 1은 5×5 창의 화소값들의 양자화 그룹 $M2, M3$ 가 2지배그룹인 경우로 식 (4-2)를 통해 계산된 화소값 149가 5×5 창의 중앙화소값 101을 대체하게 됨을 나타내고 있다.

4. 위상단면도 펼침(Unwrapping)

위상이동 알고리즘과 2 bit 양자화 스무딩 필터를 조합하여 반점잡음을 제거한 2π 불연속성을 갖는 위상단면도를 펼쳐(unwrapping) 보았다. 위상단면도 unwrapping은 1차원적인 path dependent unwrapping 알고리즘

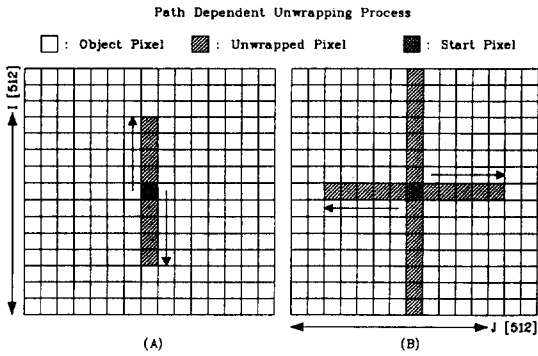


그림 7. Path dependent unwrapping 알고리즘.

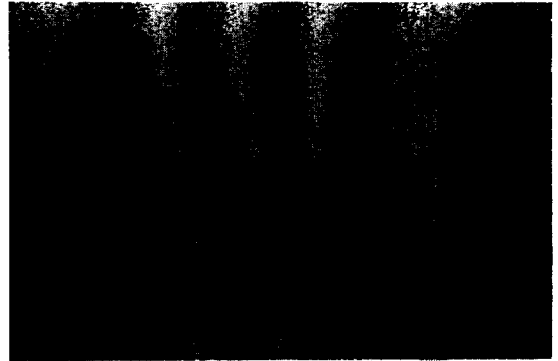


사진 2. 1 mm 절판에 변형을 가하였을때의 반점 간섭 무늬 위상단면도

Crosssection Profile

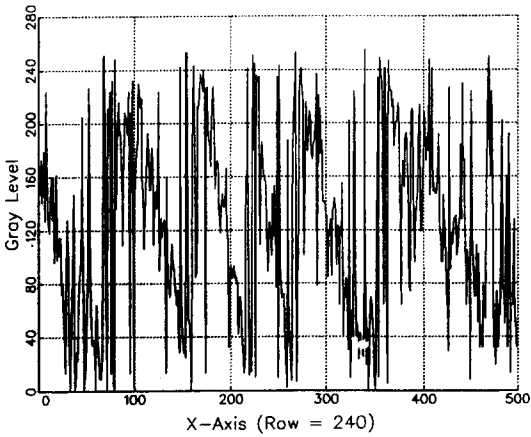


그림 8. 반점 간섭무늬 위상단면도의 위상단면 분포도.

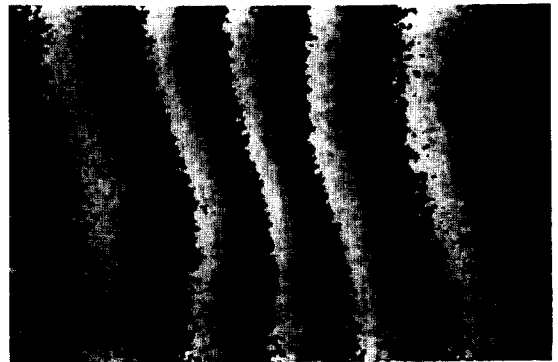


사진 3. π 이동 \rightarrow 2 bit 양자화 스무딩 \rightarrow π 이동처리의 반점 위상단면도

Crosssection Profile

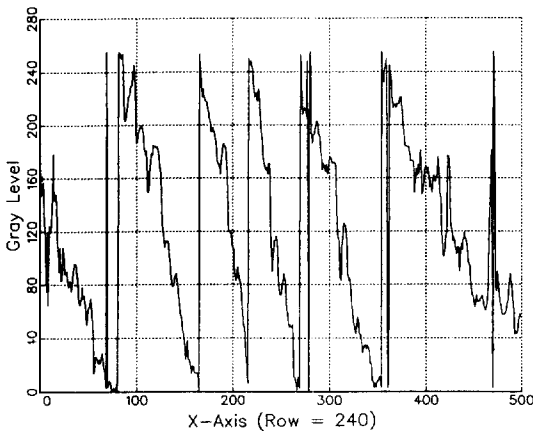


그림 9. π 이동 \rightarrow 2 bit 양자화 스무딩 \rightarrow π 이동처리의 위상 단면분포도.

을 적용하였으며 그림 7에 알고리즘을 나타내었다.

2π modulus를 갖는 위상단면도 영상의 한 좌표를 마우스로 설정을 한다. 설정된 좌표를 기점으로 행[기준] 방향으로 스캔하면서 위상값의 변화를 추적한다. 위상값 $P[I, J]$ 와 다음 열의 $P[I-1, J]$ 또는 $P[I+1, J]$ 값의 차이가 π 보다 크면 2π 의 계수를 1씩 증가시키고, $P[I, J]$ 와 다음 열의 $P[I-1, J]$ 또는 $P[I+1, J]$ 값의 차가 $-\pi$ 보다 작으면 2π 의 계수를 1씩 감소시켜 위상 단면도 영상의 행[기준]에 대한 2π 의 계수를 얻는다. 행[기준]의 2π 의 계수데이터를 기준으로 하여 열[기준] 방향으로 스캔하면서 이미지 프레임의 각 화소에 대응하는 2π 계수 정보를 얻는다. 이미지 프레임 전체에 대한 2π 계수를 정규화 한후, 필터링한 화소값에 그 화소가 갖고 있는 2π 계수에 256을 곱한 값을 더하여 정규화한다. 이에 대한 관계를 식 (5)에 나타내었다.

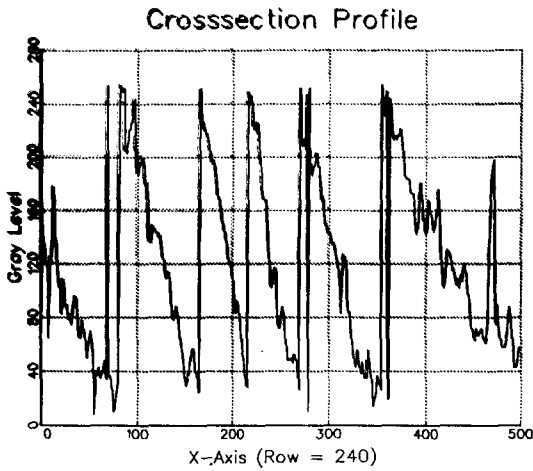


그림 10. 2 bit 양자화 스무딩 처리한 위상 단면분포도.

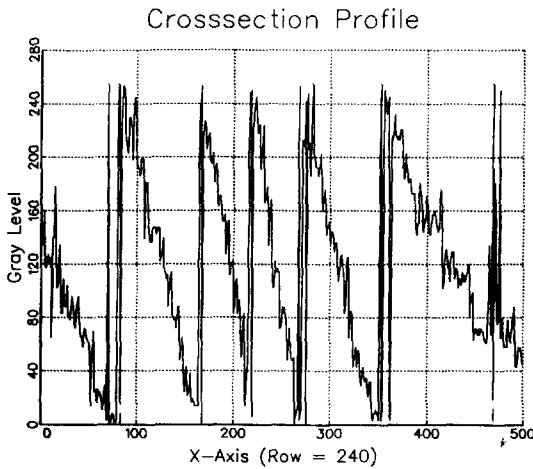


그림 11. 잡음 제거처리를 거친 최종적인 반점 간섭무늬 위상 단면분포도.

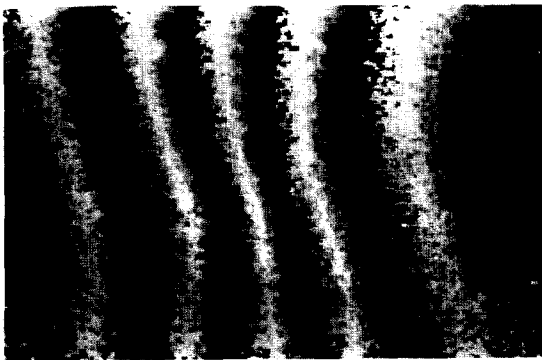


사진 4. 2 bit 양자화 스무딩 처리한 반점 위상단면도



사진 5. 잡음을 제거한 최종적인 반점 간섭무늬 위상단면도

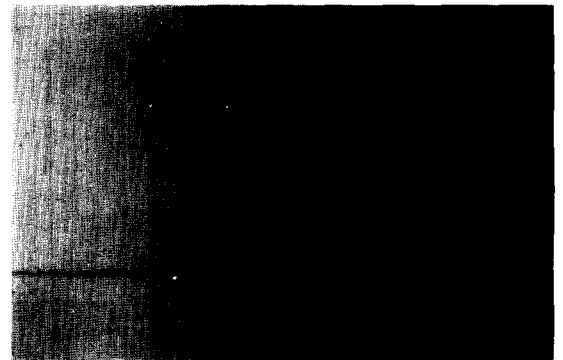


사진 6. Unwrap 된 1 mm 철판의 변형에 대한 전체위상

$$\phi_{i,j} = \frac{\phi_{i,j} + (2\pi N_{i,j})}{N_{MAX}} \quad (5)$$

여기서 $N_{i,j}$ 는 2π 계수이고 N_{MAX} 는 이미지 프레임 전체의 정규화된 2π 계수의 최대값이다.

III. 결과 및 토의

위상이동 알고리즘과 2 비트 양자화 스무딩 필터를 조합하여 처리한 결과를 그림 8~12 및 사진 2~6에 나타내었다. 사진 2는 1mm 두께의 철판에 변형을 가하였을 때의 반점 간섭무늬 위상단면도를 나타내고 있으며, 반점 간섭무늬 위상단면도의 중앙열의 단면 프로파일을 그림 8에 나타내었다.

반점 간섭무늬 위상단면도를 π 이동→2 bit 양자화 스무딩→ π 이동 처리한 것을 사진 3 및 그림 9에 나타내었다. 사진 3과 그림 9로부터 $0 \sim \pi/2$, $3\pi/2 \sim 2\pi$ 영역인

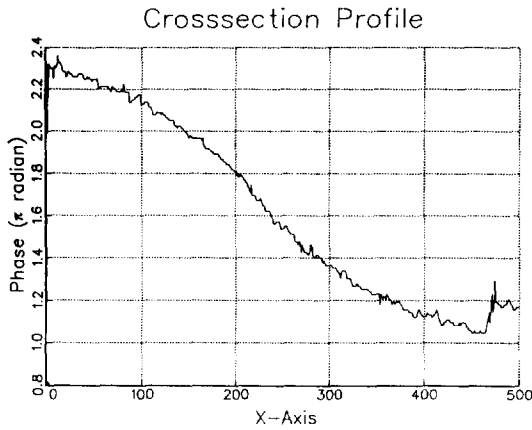


그림 12. 반점 간섭무늬 위상단면도의 펼쳐진(unwrap-ped) 위상 단면분포도사진 설명.

에지영역의 contrast가 강조되어 있음을 알 수 있다.

사진 4는 원래의 반점 간섭무늬 위상단면도를 2 비트 양자화 스무딩 처리한 것을 나타내고 있고, 그의 중앙 열에 대한 단면 프로파일을 그림 10에 나타내었다. 그림 10으로부터 2π 계수 영역에서 convolution 오차가 발생한 것을 알 수 있다.

π 이동→2 비트 양자화 스무딩 필터→ π 이동한 위상 단면도(그림 9)의 2π jump 양단의 에지 성분과 2비트 양자화 스무딩 필터를 거친 위상단면도(그림 10)의 $\pi/2 \sim 3\pi/2$ 의 선형영역의 위상을 합성한 것이 그림 11 및 사진 5로 2π jump 양단의 에지성분의 정보를 명확히 유지하면서 스무딩되어 있음을 알 수 있다.

위상이동 알고리즘과 2 비트 양자화 스무딩 필터를 조합하여 잡음을 제거한 반점 간섭무늬 위상단면도를 path dependent unwrapping 알고리즘으로 2π 계수를 펼친것을 사진 6 및 그림 12에 나타내었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 위상이동법을 통해서 얻은 반점 간섭 무늬 위상단면도의 잡음을 제거하기 위한 방법으로 위상이동 알고리즘과 2 비트 양자화 스무딩 필터를 조합 하였다. 조합결과 반점 간섭무늬 위상단면도의 2π jump 양단의 에지성분을 완벽하게 유지하면서 스무딩처리를 할 수 있었다. 잡음을 제거한 위상단면도를 펼치기 위해서 1차원적인 path dependent unwrapping 알고리즘을 적용할 수 있었다. 반점 잡음 성분을 스무딩하기 위해서 2 비트 양자화 스무딩 필터를 사용함으로써 종래의 메디안 필터에 비해 5×5 창을 적용할 경우 처리속도를 512×512 크기의 데이터 프레임에 대해 5배 빨리할 수 있었으며 메디안 필터보다 S/N비 특성이 우수하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. Jones and C. Wykes, *Holography and Speckle Interferometry*, (Cambridge University Press, 1989) pp. 165-196.
- [2] A. R. Ganeson, D. K. Sharna and M. P. Kothiyal, *Appl. Opt.* **27**, 4731(1988).
- [3] B. L. Button, J. Cutts, B. N. Dobbins, C. J. Moxon and C. Wykes, *Opt. and Laser Technol.*, **5**, 189 (1985).
- [4] G. T. Reid, *Opt. and Lasers in Engineer.*, **7**, 37 (1987).
- [5] T. M. Kreis, *SPIE*, **863**, 68(1988).
- [6] T. M. Kreis, *SPIE*, **1026**, 80(1988).
- [7] E. Vikhagen, *Appl. Opt.* **29**, 137(1990).
- [8] M. O. Petersen, *SPIE*, **1508**, 73(1991).

Noise Elimination of Speckle Fringe Phasemap

Jai Wan Cho, Suc Kyoung Hong, Sung Hoon Baik and Cheol Jung Kim
Laser Materials Processing / Metrology Group,
Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-606, Korea

(Received: May 6, 1994)

The combination of both phase-shifting convolution and 2-bit quantization smoothing filter was used to reduce speckle noise from saw-tooth speckle fringes phasemap, obtained in phase-shifting speckle interferometer. The phase-shifting convolution showed the noise reduction capability of speckle fringe without destroying edge information across 2π jump. Also, it was shown that the 2-bit quantization smoothing filter was superior to average, low-pass filter and median filter in speeding up smoothing process and enhancing S/N ratio. Finally, a path dependent unwrapping algorithm was used to unwrap a noise reduced 2π modulo speckle phasemap.