

## 이중 스펙클 간섭계를 이용한 전단간섭계의 변형 측정 한계 측정

윤병곤<sup>†</sup> · 윤재선

강릉대학교 물리학과

Ⓣ 210-702 강원도 강릉시 강릉대학로 120번지

(2004년 5월 31일 받음, 2004년 9월 9일 수정본 받음)

나뉜 렌즈를 사용하는 스펙클 전단 간섭계로 전단량(shear)에 따라 변형을 가하지 않은 상태에서 물체에 대한 동일한 두 장의 스펙클그램 쌍들을 제작하여, 이중 스펙클 기법을 사용함으로써 전단량에 따라 이 전단간섭계의 측정한계를 구하였다. 이 측정한계는 기존의 방법으로 얻어지는 값과 잘 일치함을 알 수 있었다.

주제어 : speckle, shear, digital speckle pattern interferometry(DSPI), split-lens.

### I. 서 론

일반적인 간섭계에서, 파면의 전단으로 그 파면의 위상 변화 비율을 알 수 있다. 또한 이 위상 변화 비율로부터 스트레인을 알 수 있다. 이 파면이 어떠한 곡률을 갖는 표면에서의 반사로 전단 될 때, 여기서 얻어진 무늬로부터 반사체의 곡률을 알 수 있다. 이러한 방법은 힘을 받는 물체의 변형을 연구하는 실험에 사용될 수 있지만, 물체면의 반사율이 좋아야 한다는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복할 수 있는 방법이 바로 스펙클 기법이다. 최근 사용되는 스펙클의 주된 응용 분야로는 물체의 변형 측정, 진동분석, 스트레인 측정 등이 있다.<sup>[1-5,10-12]</sup>

스트레인을 직접 측정할 수 있는 방법으로 스펙클 전단 간섭계가 있다. 이 간섭계는 스펙클 기법과 전단 기법을 혼합한 방법으로 무늬의 선명도를 높일 수 있고 물체의 변형을 측정하는 유용한 도구이다. 마이켈슨 형태의 전단 간섭계가 가장 일반적이며, 측면 전단, 동경 전단, 회전 전단, 역 전단 등을 만들어 스트레인을 측정할 수 있다.<sup>[6,9,13]</sup> 이러한 스펙클 전단 간섭계 외에도 썩기형 블록, 회전격자, 프리즘, 광속 분리기, 나뉜 렌즈 등을 사용한 스펙클 전단 간섭계들이 많이 사용되고 있다.<sup>[5]</sup>

이중 마이켈슨 간섭계를 응용한 스펙클 전단 간섭계와 썩기형 블록을 사용한 스펙클 전단 간섭계는 결상면이 서로 기울어져있기 때문에 동일한 배율의 상을 얻을 수 없으므로 낮은 무늬 가시도를 갖는다. 둘로 나뉜 렌즈를 사용하면 이점을 쉽게 보완할 수 있다. 또한 전단량을 조절하기도 매우 용이하므로 본 실험에서는 이 나뉜 렌즈를 사용하였다.

최근에는 실시간으로 측정이 가능한 DSPI(digital speckle pattern interferometry)를 이용하여 물체면에서의 변형, 스트레인 등을 측정하고 있다.<sup>[7,13]</sup> 하지만 이중 스펙클 기법에도

입하면 물체를 직접 변형시키지 않고도 변형 형태와 스트레인을 예측할 수 있다.<sup>[10]</sup>

본 연구에서는 전단 간섭계의 변형 측정한계를 측정하기 위해 이중 스펙클 방법을 사용하였다. 이 방법으로 전단량(shear)에 따라 그 측정한계를 측정하였고 기존의 이중 노출 방법에 의한 변형 측정 한계와 그 결과를 비교하였다.

### II. 이론 및 실험방법

그림 1과 같은 나뉜 렌즈는 상을 전단하는데 사용된다. 나뉜 렌즈를 사용한 간섭계에서 나뉜 렌즈 사이의 거리를  $X_{L0}$  만큼 이동하면 물체면에서의 전단량( $\delta x$ )은

$$\delta x = \left[ \frac{(1+M)}{M} \right] X_{L0} \quad (1)$$

가 된다. 여기서 M은 결상계의 배율이다. 결상면의 임의의 점에서의 위상 $\delta$ 는

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{dw}{dx} \right) \frac{1+M}{M} X_{L0} \quad (2)$$

이고,  $(dw/dx)$ 는 x방향의 스트레인이다.

간섭계의 변형 측정한계는 관측 가능한 물체의 변형 측정 범위를 일컫는 것으로, 물체가 변형될 경우 변형 전·후의 분포 사이에 상관(correlation)이 유지되는 한계를 의미한다. 이러한 스펙클 분포를 그림 2와 같은 푸리에 변환 광학계를 통하여 분석하면 결상면에 간섭무늬를 얻게 된다. 여기에서 밝은 무늬는 스트레인이 다음 식과 같이 주어질 때 관찰된다.

$$\frac{dw}{dx} = m \frac{\lambda}{2} \left( \frac{M}{1+M} \right) \frac{1}{X_{L0}} \quad (3)$$

여기에서 m은 밝은 무늬의 개수이다.<sup>[8]</sup> 이 무늬는 스펙클 분포 사이의 상관이 저하됨에 따라 그 선명도 역시 점차로 떨어

<sup>†</sup>E-mail: poenix1@hanmail.net

어지게 된다. 이 측정한계를 객관화하기 위하여 육안으로 관측되는 한계 무늬 가시도를 0.2까지로 보고, 무늬 가시도

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4)$$

가 0.2가 되는 지점을 측정한계로 정의한다.<sup>[1]</sup> 여기서  $I_{\max}$ 와  $I_{\min}$ 는 무늬의 최대 밝기와 최소 밝기를 의미한다.

그림 1에서 두 개의 독립적인 스펙클그램 쌍들을 만들기 위하여, 광원으로는 파장이 5140 Å인 Ar<sup>+</sup>레이저를 사용하였다. 초점거리  $f$ 가 0.5 m인 렌즈와 배율이 20인 현미경 대물렌즈를 사용하여 이를 확대된 평행광으로 만들었다. 여기에서 나뉜 렌즈는 직경이 43 mm이고 초점거리가 250 mm인 평면 볼록렌즈를 두 개로 똑같이 절단하여 제작하였다. 나뉜 렌즈의 한쪽은 다른 한쪽에 대하여 x, y, z방향으로 미세하게 움직일 수 있도록 제작하였으며, 다른 한쪽에는 x축과 y축을 중심으로 기울기를 조절할 수 있는 장치를 부착하였다. 각각의 렌즈 앞에는 직경이 5 mm인 구멍을 x축을 따라 y축에 대칭이 되도록 부착하였다. 이 구멍의 크기는 스펙클의 크기와 밝기가 최적화 되도록 결정하였다.<sup>[1-7]</sup>

물체와 나뉜 렌즈 사이의 거리와 나뉜 렌즈와 상간의 거리를 똑같이 340 cm로 맞추어서 배율이 1.0인 상태에서 실험을 하였다. 물체면에 대한 평행광의 입사각  $\theta$ 는 28°였다. 이러한 실험 조건하에서 전단량을 조금씩 변화시키면서 각각의 전단량에 대해 두 장씩의 동일한 스펙클그램을 제작하였다.

이렇게 하여 전단량의 크기를 0.4 mm와 1.0 mm의 배수로 17쌍의 스펙클그램을 준비하였다. 이렇게 만들어진 스펙클그램 쌍들을 가지고 변형 측정 한계를 구하기 위하여 그림 2와 같은 광학계를 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 기준 스펙클그램  $F_1$ 은 전체가 고정되어 있으며, 변형을 줄 스펙클그램  $F_2$ 는 한쪽 변만을 고정시켜 놓았다. 물체의 변형을 대신하여 스펙클그램  $F_2$ 의 고정 변으로부터 4 cm만큼 떨어진 맞은편 변을 마이크로 미터를 사용하여 수직으로 밀어서  $F_2$ 를 변형시켰다. 여기에서 물체의 변형과 동일한 효과를 주

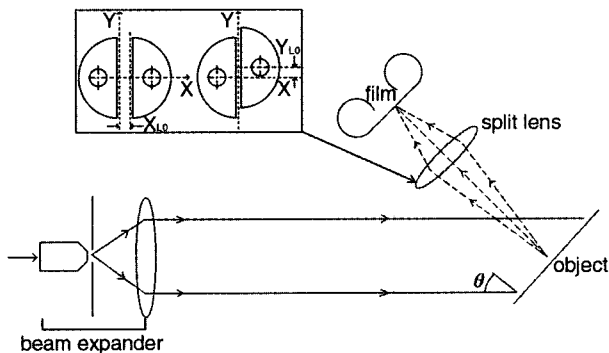


그림 1. 두 개의 독립적인 스펙클그램을 만들기 위한 스펙클 전단 간섭계.

기 위하여  $F_2$ 의 지지대를 실험 대상 물체와 동일한 재료로 제작하였다.

이중 노출의 효과를 위하여 이중 스펙클 기법에서는 두 스펙클그램을 밀착시켜서 사용하는데,  $F_2$ 를 변형시키기 이전에  $F_1$ 과  $F_2$ 를 정확히 일치시켜야 한다. 이를 위하여  $F_1$ 의 지지대는 회전은 물론 x축과 z축으로의 미세 이동과 기울기 조정이 가능하게 제작하였으며,  $F_2$ 는 y축과 z축으로 미세 이동이 가능하게 제작하였다.

변형한계를 정확히 측정하기 위해서는 두 스펙클그램을 정확히 일치시키는 것이 무엇보다 중요한데,  $F_1$ 과  $F_2$ 를 정확히 일치시키기 위하여 그림 2의  $L_1$  자리에 백색광을 놓고 반대편에서 육안으로 스펙클그램을 관찰한다. 두 스펙클그램이 정확히 일치하지 않을 때에는 스펙클그램 상의 임의의 위치에 동심원이 생성되는데,  $F_1$ 의 지지대를 미세 조정하여 두 스펙클그램 사이에 생성된 동심원이 스펙클그램의 중앙에서 없어지게 조정한다. 그런 다음 그림 2에서 실험의 위치에 스크린을 설치하고 회전과 기울기 조정 장치를 미세 조정하여 스크린에 나타나는 간섭무늬가 없어지게 함으로서 두 스펙클그램을 정확하게 일치시킨다.

전단량에 따라 변형 한계를 측정하기 위하여 각 전단량에 따라 서로 다른 스펙클그램 쌍으로  $F_1$ 과  $F_2$ 를 교체해야 한다.  $F_2$ 에 변형을 가한 상태에서 공간 필터링하면 그 변형의 세기에 따라 그림 3과 같은 결과를 얻는다.  $F_2$ 의 한 변의 종변위를 2 μm씩 증가시켜 나가면서 변형 무늬의 세기를 측정하였으며, 변형 한계점 부근에서는 1 μm씩 변화시키면서 측정하였다. 무늬의 세기를 측정하기 위하여 렌즈  $L_2$ 의 결상면에 광 검출기를 장치하였다. 이때 무늬의 세기 분포를 충분히 감지 할 수 있도록 5 mm×1 mm의 폭을 갖는 실험을 광 검출기 앞에 무늬의 방향과 평행하게 부착하였다. 광 검출기로 무늬 분포를 훑음에 따라 무늬의 세기가 전압의 크기로 변환되어 DMM(Digital Multimeter)에 측정된다. 이 값을 컴퓨터로 기록하였다. 이때 광 검출기를 천천히 움직이게 하기 위해 step motor에 미세한 기어를 연결하여 분당 3 cm씩 움직이게 조정하였으며 0.1초에 한번씩 광 검출기의 전압을 측정하였다.

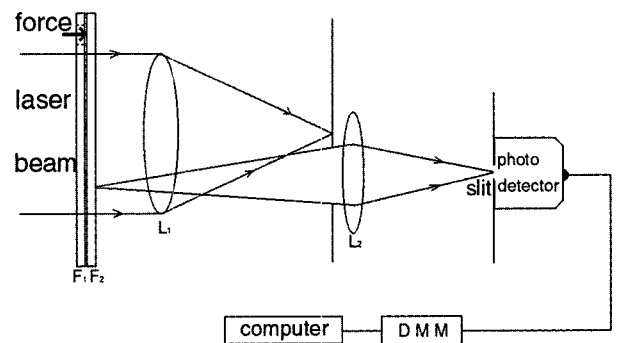


그림 2. 스펙클 전단 간섭계의 변형 한계측정을 위한 광학계.  $F_1$ 은 기준 스펙클그램이며  $F_2$ 는 변형 가능한 스펙클그램이고 DMM은 Digital Multimeter이다.

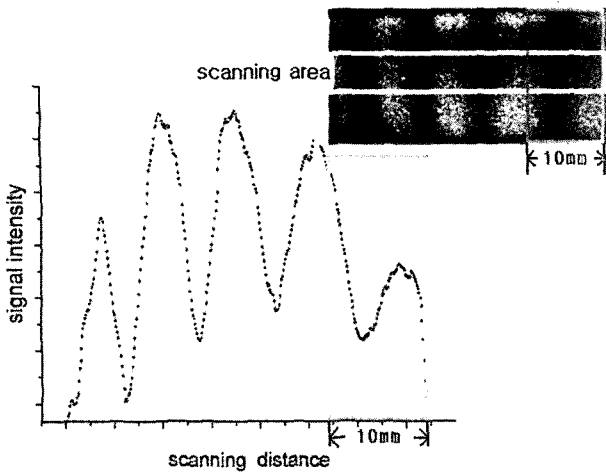


그림 3. 광검출기로 측정된 변형 무늬의 세기.  
전단량 1.0 mm, 끝단 종변위 20  $\mu\text{m}$ , 가시도 0.30

그림 3은 전단량이 1.0 mm일 때 제작된 스펙클그램 쌍을 사용하여,  $F_2$  끝단의 종변위가 20  $\mu\text{m}$ 일 때 무늬의 세기를 컴퓨터로 기록한 것이다. 이때 무늬 가시도는 변형이 제일 많이 일어나는  $F_2$ 의 끝단으로부터 10 mm까지의 부분에만 적용하였으며, 그림 3의 경우에는 0.30으로 계산되었다. 여기에서 scanning area로 표시된 부분은 광 검출기 앞에 장착된 실패로 훑은 지역을 나타낸다.

이와 같은 방법으로 각각의 전단량에 따라 무늬가시도가 0.2 이하로 측정되는 지점의 변형을 그 한계점으로 하여 그 측정 한계를 구하였다.

### III. 실험결과

그림 4는 본 실험에서 사용한 이중 스펙클 기법과 물체면에 직접 변형을 가하는 기존의 이중 노출 기법으로 측정된

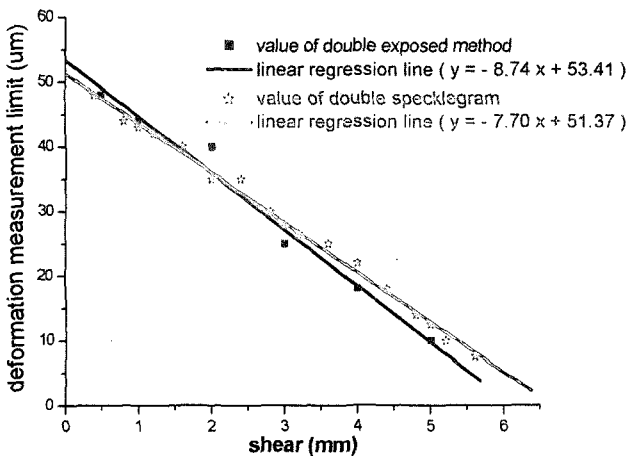


그림 4. 전단량에 따른 변형 한계 측정.  
이중 스펙클 기법을 사용하여 얻은 결과가 기존의 이중 노출 기법에 의해 얻은 결과와 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

측정 한계 값들을 비교한 그래프이다. 여기서 이중 스펙클 기법으로 얻은 실험값을 선형회귀하면  $w = -7.70\delta x + 51.37$  이 된다. 여기에서  $\delta x$ 는 전단량을 그리고  $w$ 는 미소 변형 측정 한계를 나타낸다. 이는 기존의 이중 노출 기법에 의해 얻은 변형 측정 한계의 선형회귀선  $w = -8.74\delta x + 53.41$ 와 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

그림 5는 이중 스펙클 기법을 사용하여 전단량을 1.0 mm로 일정하게 고정된 채,  $F_2$ 의 한쪽 끝에 10  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , 25  $\mu\text{m}$ 의 종변위를 주었을 때 공간 필터링하여 얻은 무늬이다.

그림 6은 그림 5와 같은 조건하에서 스펙클그램의 한쪽 모서리에 종변위를 가했을 때 얻은 무늬이다.

그림 7는 전단량이 1.0 mm일 때  $F_2$ 의 중앙에 힘을 가하고 이를 공간 필터링하여 얻은 무늬이다.  $F_2$ 의 중앙에 실패를 매달아서 왼쪽으로 잡아 당겼기 때문에 그림에서와 같이 실패의 그림자가 중심으로부터 왼쪽으로 직선 형태로 나타나 있다.

이상과 같이 이중 스펙클 기법을 사용하면 물체 자체에 직접 변형을 가하지 않고도 스펙클그램 쌍만을 가지고도 힘의 크기와 위치에 따라 그 스트레인의 형태를 모의 실험할 수 있었다.

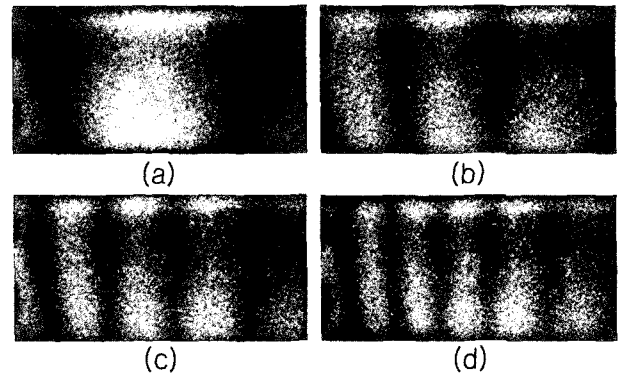


그림 5. 푸리에 변환으로 얻은 무늬.

1.0 mm의 전단량에 의한 (a) 10  $\mu\text{m}$ , (b) 15  $\mu\text{m}$ , (c) 20  $\mu\text{m}$ , (d) 25  $\mu\text{m}$ 의 끝단 종변위.

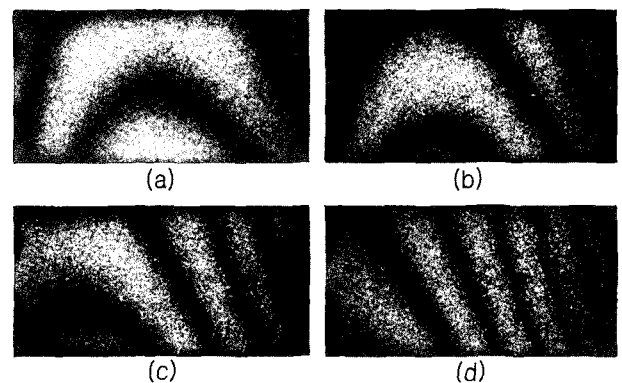


그림 6. 대각선 방향으로 변형을 줄때 얻은 무늬.

0.1 mm의 전단량에 의한 (a) 10  $\mu\text{m}$ , (b) 15  $\mu\text{m}$ , (c) 20  $\mu\text{m}$ , (d) 25  $\mu\text{m}$ 의 끝단 종변위.

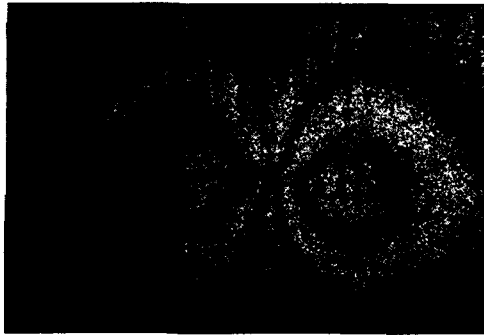


그림 7. 전단량 1.0 mm에서 중앙에 변형을 줄 때 얻은 무늬.

#### IV. 결 론

나뉜 렌즈를 사용한 스펙클 전단 간섭계로 물체를 직접 변형시키지 않고도 변형 측정 한계를 연속적으로 측정하기 위해 이중 스펙클 기법을 사용하였다. 이 전단 간섭계의 전단량에 따른 변형 측정 한계는 그림 4에서 보는바와 같이 물체를 직접 변형시키면서 얻어진 이중 노출 방법에 의한 변형 측정 한계값과 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 따라서 이중 스펙클 기법으로 전단 간섭계의 변형 측정 한계를 예측하는데에 큰 무리가 없을 것으로 사료되며, 물체에 직접 변형을 가하지 않고도 물체의 스트레인 형태를 예측하는 실험도 가능함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

[1] R.K. Erf, editor, *Speckle metrology* (Academic Press, New York, 1978).

[2] R. Jones, C. Wykes, *Holographic and speckle interferometry* (Cambridge University Press, New York, 1983).  
 [3] J.C. Dainty, *Laser speckle and related phenomena* (Springer-Verlag, New York, 1984).  
 [4] 이상수, 레이저 스펙클과 홀로그래피 (교학연구소, 서울, 1988).  
 [5] R.S. Sirohi, editor, *Speckle metrology* (Marcel Dekker, New York, 1993).  
 [6] V.P. Shchepinov, V.S. Pisarev, *Strain and stress analysis by holographic and speckle interferometry* (Wiley, New York, 1996).  
 [7] P.K. Rastogi, editor, *Digital speckle pattern interferometry and related techniques* (Wiley, New York, 2001).  
 [8] R.K. Murthy, R.S. Sirohi, M.P. Kothiyal, "Detection of defects in plate and diaphragms using split-lens speckle shearing interferometer," *NDT International*, vol 15, pp. 329-333, 1982.  
 [9] A.R. Ganesan, D.K. Sharma, Kothiyal, "Universal digital speckle shearing interferometer", *Appl Opt*, vol. 27, pp 4731-4734, 1988.  
 [10] 윤재선, 강규석, "이중 스펙클 간섭계를 이용한 미소변형의 연속측정", *새물리*, vol. 27, pp. 430-433, 1987.  
 [11] 윤재선, 전상일, 강규석, "전자 스펙클 무늬 간섭계를 이용한 미소변형의 측정", *새물리*, vol. 29, pp. 526-531, 1989.  
 [12] 한승룡, 김창열, 윤재선, "이중 스펙클 간섭계에 의한 종변위 측정한계 측정", *새물리*, vol. 30, pp. 425-430, 1990.  
 [13] P.K. Rastogi, N.K. Mohan, "Recent development in digital speckle pattern interferometry", *Opt Lasers Eng*, vol. 40, pp. 439-445, 2003.

### Measuring limits of speckle shearing interferometer by double speckle interferometry

Byung Gon Yoon<sup>†</sup> and Jae Sun Yoon

Department of Physics, Kangnung National University  
 120 Gangneung Daehangno, Gangneung, Gangwon, 210-702, Korea

<sup>†</sup>E-mail: poenix1@hanmail.net

(Received May 31, 2004, Revised manuscript September 9, 2004)

In this paper, we used a split-lens speckle shear interferometer using a double speckle interferometer, which enables continuous measurement of the deformation. We made two identical specklegrams corresponding to an object. With this method we could detect the measuring limits of the deformation for various shears. This experimental results showed that the measuring limits of a split-lens speckle shear interferometer are similar to the measuring limits of a double exposure speckle interferometer.

OCIS Codes : 030.6140.