

홀로스펙클 간섭법을 이용한 3차원 변형측정 연구

박승욱·권영하*·유성규

한국표준연구소 분광색채연구실, *힘연구실

(1990년 2월 10일 받음)

홀로그래피 간섭법과 스펙클 사진법을 결합한 홀로스펙클 간섭법을 이용하여 3차원 변형을 측정하였다. 이 방법은 이중노출된 하나의 사진건판으로부터 중변위와 횡변위를 모두 알아낼 수 있어 3차원 변형측정에 매우 유용하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 물체의 일부분에 밀집되어 일어나는 변형을 측정하기 위하여 image holography 에 기초를 둔 광학시스템을 구성하였다. 시스템의 배율을 적절히 증가시키고 기준파의 세기를 감소시킴으로써 보통의 홀로그램에 비해 스펙클의 효과를 증대시켰다. 이로써 가시도가 높은 Young 의 무늬 뿐만 아니라 확대되고 명확한 홀로그래피 간섭무늬를 얻을 수 있어 indentor 에 의한 3차원 접촉변형을 측정하였다.

I. 서 론

3차원 변형을 측정하기 위한 광학적 방법으로는 홀로그래피 간섭법(holography interferometry), 스펙클 사진법(speckle photography), 스펙클 간섭법(speckle interferometry), 모아레 간섭법(moire interferometry) 등을 들 수 있다. 여기서 홀로그래피 간섭법은 가장 높은 정밀도와 감도를 지니고 있고 입체적으로 물체를 재생할 수 있는 장점을 지니고 있으나, 3차원 변위를 측정하기 위해서는 여러 방향에서 홀로그램을 동시에 기록하여 분석하여야 하므로 복잡한 광학시스템의 구성과 수학적 해석이 필요하다. 따라서 일반적으로 종방향의 변위(out-of plane displacement)는 홀로그래피 간섭법으로 결정하고, 횡방향의 변위(in-plane displacement)는 광학시스템과 해석이 매우 간단한 스펙클 사진법을 사용하여 측정하고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

그러나 최근에는 홀로그래피 간섭법과 스펙클 사진법을 결합한 하나의 시스템으로부터 3차원 변위를 측정하는 방법이 연구되고 있다. 즉, 물체의 변형에 따른 물체파의 위상과 세기의 변화가 기록된 사진건판을 홀로그래피 방법으로 재생시켜 중변위를 측정하고, 이를 다시 스펙클 사진법으로 처리함으로써 횡변위를 알아내는 방법이다. 1974년 Adams 와 Maddux 가 처음으로 이러한 방법을 제안한 후,⁽⁵⁾ 1984년 F. P. Chiang 에 의해 홀로스펙클 간섭법(Holospeckle interferometry)이라는

새로운 이름으로 여러 가지 방법이 개발되었다.⁽⁶⁻⁸⁾

홀로스펙클 간섭법의 개념은 비교적 간단하지만 이를 실제로 적용할 경우에는 그 목적에 따라 특수한 광학시스템의 구성이 필요하다. 본 연구에서는 물체의 일부분에 밀집되어 일어나는 미소변형을 확대하여 측정할 수 있는 시스템을 구성하여⁽⁹⁾ indentor 에 의한 접촉변형을 3차원적으로 측정하였다.

II. 실험장치 및 방법

본 실험장치의 구성도는 Fig. 1과 같으며 시스템의 기본구성은 물체의 상을 기록하는 image holography 로 이루어져 있으나, 시스템의 배율을 $M=4$ 로 하고 필름면에 도달되는 기준파와 물체파의 세기비가 1:1이 되도록 하였다.

광원으로는 12mW 출력의 He-Ne laser 가 사용되었으며, variable beam splitter 로 기준파와 물체파를 원하는 비율로 나누고, 각각을 현미경 대물렌즈와 pin hole 을 사용하여 확대광속으로 만들었다. 물체로부터 산란된 빛을 렌즈 $L(F/3)$ 로 모아 형성되는 물체의 상이 기준파와 간섭을 일으켜 사진건판에 기록되도록 하였다. 동일한 사진건판에 변형 전과 후의 상태를 이중노출하여 화학처리하여 얻은 홀로스펙클그램(holospeckle-gram)을 다음의 두 과정으로 처리함으로써 3차원 변형을 측정하였다.

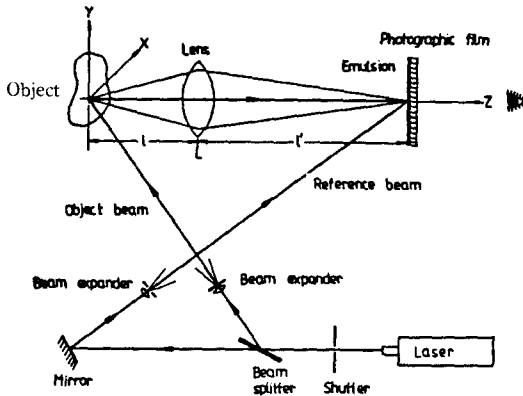


Fig. 1. Optical arrangement for recording hologram.

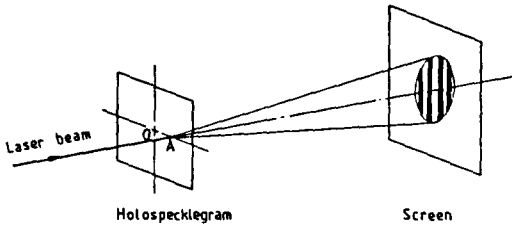


Fig. 2. Optical arrangement for pointwise filtering.

즉, 종변위는 보통의 홀로그래피 간섭법과 같이 홀로 스펙클그램에 기준파를 다시 비추어 홀로그래피 간섭무늬를 재생시킴으로써 구하여졌다. 이 때 Fig. 1의 관측자 위치에서 홀로스펙클그램면에 재생된 실상(real image)을 관측하기 위하여, 기준파의 입사방향을 바꾸는 대신에 사진건판을 180도 뒤집어서 사용하였다. 횡변위는 동일한 홀로스펙클그램에 다시 스펙클 사진법에서 사용되는 처리를 함으로써 구하여 질수 있다. 처리방법에는 여러 가지가 있으나 본 실험에서는 광학시스템이 매우 간단하여 간편하게 간섭무늬를 얻고 해석할 수 있는 pointwise filtering 방법을 사용하였다. Fig. 2와 같이 물체의 상이 기록된 홀로스펙클그램에 가는 폭의 레이저 빛을 비추어 Young의 무늬를 관측함으로써 물체 각 부분의 변위를 구하였다.

측정물체인 indenter와 base plate는 임자분포가 균일하고 반투명한 아크릴계 고분자 화합물로 Fig. 3과 같이 가공하였다. Base plate는 indenter에 비해 충분히 크며, indenter의 끝점이 base plate의 가장자리에 닿게 접촉시키고 수직항 힘을 가하기 위하여 loading frame을 제작하였다. Loading frame의 동력으로는 AC 모터를 사용하였으며 기어박스에 의해서 힘이 전달

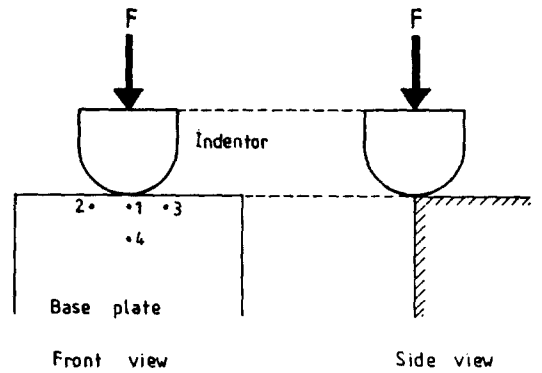


Fig. 3. Schematic diagram for contact loading system.

되도록 설계하였다. 4개의 지지대가 아래, 윗판을 지지하고 있으며 모터와 기어박스를 윗판에 설치하였다.

III. 결과 및 검토

광학적으로 거친 표면을 가진 물체에 레이저 광속을 비추면, 표면에서 산란된 빛들의 위상차로 공간상에 무질서한 형태의 간섭무늬인 스펙클이 형성된다. 따라서 물체에서 산란된 빛이 기준파와 간섭을 일으켜서 기록되는 홀로그램에도 스펙클이 함께 기록되게 된다. Fig. 1의 실험장치로 기록한 사진건판의 현미경 사진(x800)이 Fig. 4에 나타나 있다. 두 빛의 간섭으로 형성된 격자와 스펙클 무늬가 중첩되어 기록된 것을 볼 수 있다. 홀로 스펙클그램 기록시 배율 $M=4$ 로 하고 필름면에 도달되는 기준파와 물체파의 세기비를 1:1로 함으로써 보통의 홀로그램에 비해 스펙클의 평균크기와 세기를 증가시켰다. 따라서 pointwise filtering에 의해 얻어지는 Young 간섭무늬의 가시도가 높아지게 되나 반면에 홀로그래피 간섭무늬의 가시도는 떨어지게 되므로 이를 고려하여 시험해본 결과 배율을 $M=4$ 로 결정하였다.

실험대상으로 Indenter의 접촉부근에 밀집되어 3차원적으로 일어나는 변형을 택하였는데, 이러한 접촉변형은 미소한 부분에 밀집되어 일어나므로 보통의 홀로그래피 시스템으로는 간섭무늬를 명확하게 분간하기 어려운 변형이다. Fig. 5는 본 시스템으로 얻어진 홀로그래피 간섭무늬로써 종변위의 윤곽을 나타내고 있다. Indenter 접촉부근의 좁은 간섭무늬 간격으로부터 접촉지점의 밀집된 변형을 볼 수 있으나, 간섭무늬가 대칭을 이루지 않고 한쪽으로 치우치는 것으로 보아 힘이 정확하게 수직으로 작용되지 않았음을 판단할 수 있다. 확대되어 재생된 상에 명확한 간섭무늬가 중첩되어 관측되므로 이로부터

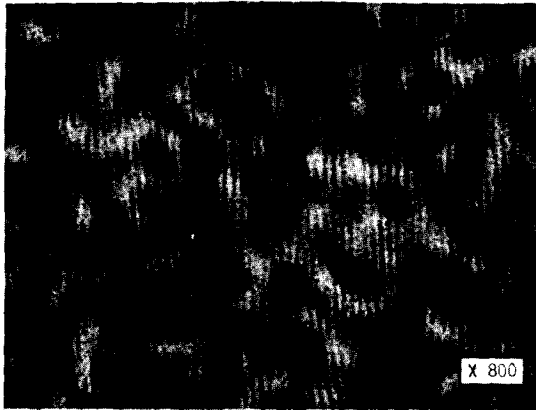


Fig. 4. Microscopic photograph of holospecklegram.

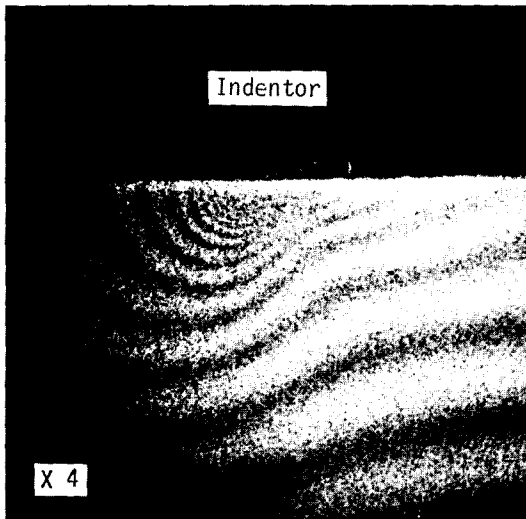


Fig. 5. Demonstration of holographic interference pattern formed by out-of-plane displacement.

터 각 부분의 정량적인 변형해석도 가능해 질수 있다.

Fig. 6a, b, c, d는 물체의 확대된 상이 기록된 홀로스펙클그램면에서 Fig. 3의 1, 2, 3, 4 지점과 대응되는 지점에 레이저를 비추어 pointwise filtering 하여 얻은 Young의 간섭무늬이다. Indenter와의 접촉 바로 아래 부분에서는 여러 방향으로 힘이 작용되기 때문에 간섭무늬가 중첩되어 Fig. 6a와 같은 무늬를 얻었다. 측정 대상에 힘이 수직하게 작용되었다면 Fig. 6b와 6c는 서로 대칭을 이루게 될 것이다. 그러나 실험결과 Fig. 6b와 6c의 무늬가 방향이 같고 무늬간격만 다르게 측정되었다. 이로부터 실제로는 indenter로부터 base plate의 2번

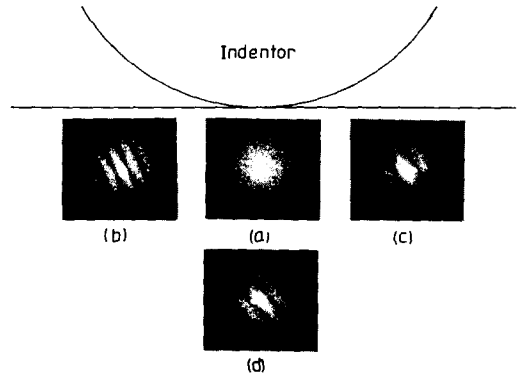


Fig. 6. Young's fringe patterns for determination of in-plane displacement vectors at 4 points shown in Fig. 3.

방향으로 치중되게 힘이 가해졌음을 알 수 있다. 이는 Fig. 5의 종변형 윤곽으로부터 예측되었던 힘의 방향과 일치하고 있다. 또한 접촉부근으로부터 떨어져 있는 4번 지점에서는 다른 지점에 비해 아래방향으로 힘이 크게 가해지게 되므로 Fig. 6d의 무늬방향이 Fig. 6b와 c에 비해 수평에 가까워짐을 볼 수 있다. 따라서 이러한 무늬의 방향으로써 가해진 힘의 방향을 알 수 있다. 또한 pointwise filtering 방법을 사용할 경우 얻어진 간섭무늬의 간격으로부터 각 지점에서 발생된 변위의 절대적 크기를 알 수 있는 장점을 지니고 있으나, 본 실험에서는 Fig. 6의 간섭무늬로부터 상대적인 변위크기만을 비교하였다. 즉, 2번 지점의 변위가 가장 크며, 3번 지점에서는 다른 부분에 비해 가장 미소한 변위가 일어났음을 알 수 있다.

IV. 결 론

홀로스펙클 간섭시스템을 구성하여 indenter의 접촉부근에 밀집되어 일어나는 변형을 3차원적으로 측정하였다. 이중노출된 홀로스펙클그램을 홀로그래피 방법으로 재생시킴으로써 종변위의 contour를 얻었고, pointwise filtering에 의해 각 지점에서의 횡변위의 방향과 크기를 결정할 수 있었다. 본 시스템은 기존의 3차원 측정장치에 비해 간단하며, 일반적인 홀로그래피 간섭법으로는 측정하기 어려운 밀집된 변형에 대해 확대되고 명확한 간섭무늬를 얻을 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 본 방법은 간섭무늬의 수학적 해석이 간단하므로 3차원 변형의 정량적 해석에 응용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] W. F. Ranson, M. A. Sutton and W. H. Peters, *Handbook on Experimental Mechanics*, Society for Experimental Mechaics, 388-429 (1987).
- [2] 이상수, “레이저 스펙클과 홀로그래피”, 124-135, 236-246(1988).
- [3] 박승옥, 이상수, *새물리*, 25(4), 423-431(1985).
- [4] F. P. Chiang and Q. B. Li, *Appl. Opt.*, 23(24), 4469-4470 (1984).
- [5] F. D. Adams and G. E. Maddux, *Appl. Opt.* 13(2), 219-220 (1974).
- [6] Q. B. Li and F. P. Chiang, *Opt. Eng.* 27(3), 200-206 (1988).
- [7] X. P. Wu and F. P. Chiang, *International Conference on Speckle*, H. H. Arsenault, ed., *Proc. SPIE* 556, 347-349 (1985).
- [8] F. P. Chiang, Q. B. Li, and J. B. Chen, *Thirteenth Congress of Int. Commission of Optics (ICO-13)* (Sapporo, Japan), (1984).
- [9] 박승옥, 권영하, 유성규, 제 5회 파동 및 레이저 학술 발표회 논문집 (1990).

Measurement of 3-D Deformation by Using Hologospeckle Interferometry

Seung Ok Park, Young Ha Kwon*, and Sung Gyu Yu
*Spectroscopy and Color Lab., *Force Lab. Korea Standards Research Institute*

(Received; February 10, 1990)

Hologospeckle interferometry, the combined technique of holographic interferometry and speckle photography, was applied to the measurement of 3-D contact deformation created by an indenter. This new technique makes possible to measure both in-plane and out-of-plane displacements from one photographic plate.

In this study, the optical system based on image holography was set up. In order to enhance the size and the contrast of the speckle, a proper magnification and a low reference beam ratio was used as compared with the conventional holographic interferometry technique. This system shows the magnified and clear holographic interference fringe as well as Young's fringe patterns.