

〈論 文〉

홀로스펙클 간섭법을 이용한 3차원 변위측정의 정량적 연구

주진원* · 권영하** · 박승옥***

(1992년 11월 5일 접수)

Quantitative Analysis of 3-D Displacements Measurement by Using Holographic Interferometry

Jin W. Joo, Young H. Kwon and Seung O. Park

Key Words : Holographic Interferometry(홀로그래피 간섭법), Speckle photography(스펙클 사진법), Holographic Interferometry(홀로스펙클 간섭법), Fringe Pattern(간섭무늬), Young's Fringe Pattern(영의 간섭무늬), Ball Indentation(볼 압입)

Abstract

The simple and effective optical technique synthesizing holographic interferometry and speckle photography is presented. The optical system used in this experiment is based on image holography. A cantilever beam located on the precision translator is used to evaluate this measurement system. Experimental results agree well with the actual displacements within the error of 2.8%. As an its application, three dimensional contact deformation in the ball indentation is measured by using this optical system and compared with the numerical analysis by finite element method.

1. 서 론

물체의 변형을 측정하는 방법으로 스트레인 게이지 방법이 널리 사용되어 왔으며 광학적인 방법으로는 광탄성법과 모아레법 등이 함께 사용되고 있다. 최근에 레이저의 발달로 홀로그래피 간섭법과 스펙클 사진법이 기계공학에 응용되어 높은 정밀도를 가지고 비접촉식인 변형측정에 사용되고 있다.

홀로그래피 간섭법⁽¹⁾은 대상물체를 입체적으로 기록하고 재생할 수 있으며, 재생된 영상과 함께 미소변위를 나타내는 간섭무늬를 얻을 수 있다는 장점이 있다.^(2,3) 그러나 3차원의 변위를 측정하기 위해서는 동시에 여러방향에서 홀로그램을 기록할 수 있는 복잡한 광학시스템이 필요하므로, 주로 면의

변위(out-of-plane displacement)를 측정하는 경우에 응용되고 있다. 반면에 스펙클 사진법은 비교적 간단한 광학장치로 면내변위(in-plane displacement)를 측정하는데 유용하게 사용될 수 있으며,^(4,5) 진동에 영향을 적게 받기 때문에 실험하기에 매우 간편한 방법이다.

실제의 공학문제에서는 2차원 변위를 측정하면 충분한 경우도 있지만 3차원의 모든 변위성분을 측정하여 변형상태와 응력상태를 결정하여야 하는 경우가 대부분이다. 최근에는 이를 효율적으로 달성하기 위하여 홀로그래피 간섭법과 스펙클 사진법을 하나의 광학시스템에 결합시켜 한개의 홀로그램으로 부터 면외변위와 면내변위를 측정할 수 있는 방법이 연구되고 있다. 즉, 물체의 변형에 따른 물체 파의 위상변화와 세기변화를 동시에 사진건판에 기록하여 홀로그램을 제작하고, 이를 홀로그래피 방법으로 재생시켜 홀로그래피 간섭무늬를 얻고, 동일한 홀로그램에 기록되어 있는 스펙클 무늬에 다

*정회원, 한국표준과학연구원 역학물성연구실

**정회원, 경희대학교 섬유공학과

***정회원, 대전대학교 물리학과

시 레이저를 비추어 영의 무늬(young's fringe)를 얻는 방법이다. 1974년 Adams 와 Maddux⁽⁶⁾가 처음으로 이러한 방법의 기본개념을 제안한 후, Ching 등^(7,8)에 의해 홀로스펙클 간섭법(holospeckle interferometry)이라는 이름으로 여러가지 응용방법이 개발되고 있다.

본 장치의 핵심은 상 홀로그래피(image holography) 시스템을 구성하여 상을 확대시키고, 기준파(reference beam)의 세기를 일반적인 홀로그래피 방법에 비해 매우 약하게 하여 홀로그램 기록시 확대된 영상에 스펙클 무늬를 선명하게 기록되도록 한 것이다. 물체에 미소변위를 가하여서 변형 전과 후의 상태를 이중으로 기록한 홀로그램을 얻은 후, 이로부터 확대된 홀로그래피 간섭무늬와 선명한 영의 무늬를 얻을 수 있었다. 본 시험장치로 구성된 홀로스펙클 방법의 신뢰성을 평가하기 위하여 이론적인 변위량을 알고 있는 외팔보의 변형을 대상으로 하여 실험하였다. 외팔보에 면외변위와 면내변위를 각각 발생시켜 이때 얻어지는 홀로그래피 간섭무늬와 영의 간섭무늬의 간격으로부터 변위를 정량적으로 분석하였으며, 면외변위와 면내변위를 동시에 발생시켜 면내변위가 홀로그래피 간섭무늬에 미치는 영향과 면외변위가 영의 간섭무늬에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 홀로스펙클 방법을 이용하여 일반적인 방법으로는 측정이 어려운 불 압입 문제의 3차원 변형상태를 측정하고 유한요소법의 결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 상 홀로그래피 시스템의 구성도를 보여 주고 있다. 본 시스템에 사용한 광원은 12 mW 출력의 He-Ne 레이저이며, 이 레이저의 파장은 $0.633 \mu\text{m}$ 이다. 일반적인 홀로그래피의 실험장치와 다른점은 대상물체와 홀로그램 사이에 렌즈(초점거리 $f=150 \text{ mm}$, 구경 $D=50 \text{ mm}$)를 삽입하여 확대된 상 홀로그램을 얻는다는 것이다. 상 홀로그래피 방법은 명확한 상을 확대하여 기록할 수 있을 뿐만 아니라, 상 재생시 스펙클에 의한 광학적인 잡음이 나타나지 않는 장점을 가지고 있다.⁽⁶⁾ 따라서 상 홀로그래피 시스템에서는 기준파의 세기를 일반적인 홀로그래피에서 보다 매우 약하게 하여도 선명하게 재생된 상을 얻을 수 있다. 본 실험에서는 빛 분할기(beam splitter)를 이용하여 레이저에서 진

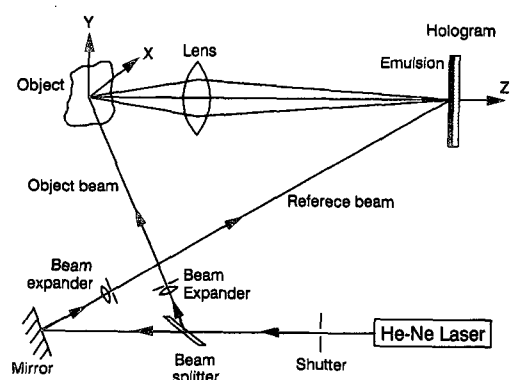


Fig. 1 Optical arrangement of holospeckle interferometry for measurement of three dimensional deformation

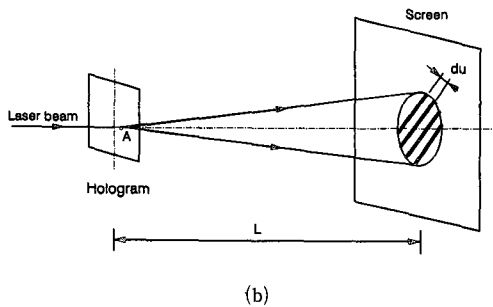
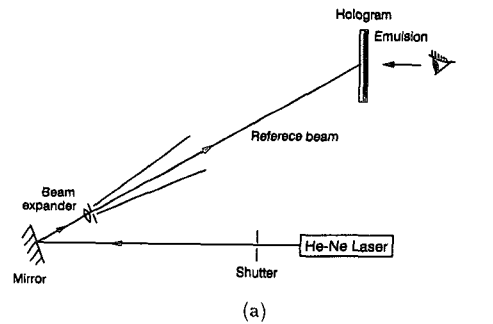


Fig. 2 Optical arrangement for reconstruction of holographic fringe pattern (a) and Young's fringe pattern (b)

행되는 빛을 기준파(reference beam)와 물체파(object beam)로 나누고 그 비율이 50 : 50이 되도록 조절하여 홀로그램에 확대된 홀로그래피 간섭무늬와 함께 선명한 스펙클 간섭무늬가 기록되도록 하였다.

홀로스펙클 간섭법을 이용하여 3차원의 변위를

측정하기 위하여는 기록과 재생의 두과정이 필요하게 된다. 기록방법으로는 홀로그래피 간섭법의 이중노출(double exposure)⁽⁹⁾방법을 사용하였다. 즉, 앞에서 설명한 광학장치를 이용하여 대상물체가 변형되기 전과 변형한 후의 영상을 동일한 사진건판에 기록한 후 현상처리하여 홀로그램을 얻었다.

이중노출된 홀로그램을 기록할 때와 같은 사진건판의 위치에 고정시킨 후 Fig. 2(a)와 같이 레이저의 기준과 만을 이용하여 재생시키면 물체의 상과 함께 홀로그래피 간섭무늬를 얻을 수 있다. 상 홀로그래피에서는 확대된 상이 기록되기 때문에 인접된 간섭무늬 사이의 거리는 확대비율만큼 크게 나타난다. 이와같이 얻어진 홀로그래피 간섭무늬로부터 물체의 면외변위가 결정될 수 있다.

면내변위는 Fig. 2(b)와 같이 동일한 홀로그램 상의 변위를 측정하고자 하는 위치에 가는 폭의 레이저 빛을 비추어 거리가 L 만큼 떨어진 스크린 상에 형성된 영의 무늬를 해석함으로써 얻을 수 있다. 스펙클 사진법으로 측정할 수 있는 최소 변위의 크기 $|u_{\min}|$ 는 렌즈의 구경비 $F(=D/f)$ 와 배율 M 으로 다음과 같이 결정된다.

$$|u_{\min}| \approx \lambda F \frac{1+M}{M} \quad (1)$$

따라서 본 실험장치($F=3$, $M=4$)로 측정할 수 있는 최소변위의 크기는 약 $2.4 \mu\text{m}$ 이다. 영의 간섭무늬는 원하는 지점에 레이저 빛을 비추어서 변위에 대한 정보를 얻어내므로 여러점의 면내변위를 알고 싶을 경우에는 여러번의 재생과정을 거치게 된다.

3. 외팔보 변형에 의한 정량적 평가

3.1 외팔보 시험장치

본 논문에서 개발된 홀로스펙클 방법의 신뢰성을 평가하기 위하여 면내변위와 면외변위를 발생시킬 수 있는 외팔보를 대상물체로 선택하여 실험하였다. 제작된 외팔보는 유효길이 250 mm, 폭 25 mm, 두께 5 mm 가 되도록 알루미늄으로 제작하였다. Fig. 3과 같이 외팔보의 한쪽 끝을 나사로 단단히 고정하여 고정단의 경계조건을 만족하도록 하였으며 두개의 마이크로미터를 사용하여 정확한 변위를 발생시켰다. 마이크로미터 1은 외팔보의 자유단에 설치하여 면외변위를 발생시키도록 하였고,

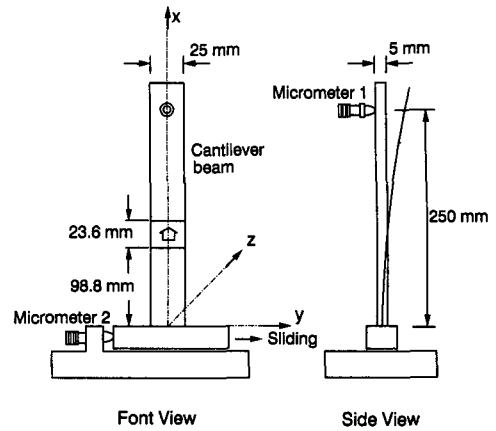


Fig. 3 Schematic diagram of the cantilever beam

마이크로미터 2로는 외팔보를 고정시킨 슬라이더를 옆으로 밀어서 외팔보 전체가 강제이동을 하여 면내변위가 정확하게 발생하도록 하였다.

외팔보의 이론식이 실제의 변형과 일치하기 위해서는 보의 두께에 비해서 길이가 대단히 길어야 한다. 따라서 보의 전체를 확대시켜 한 홀로그램에 모두 기록하기는 어려우므로 고정단에서 길이방향으로 98.8 mm 떨어진 곳(A)으로부터 122.4 mm 떨어진 곳(B)까지 범위의 시편을 한 홀로그램에 기록되도록 하였다. 본 논문에서 사용한 광학적 방법은 상 홀로그래피 방법이므로 물체의 형상도 간섭무늬와 함께 기록된다. 이를 이용하여 Fig. 3에서와 같이 시편에 화살표 표시를 하여 상하가 혼동되지 않고 배율이 정확한지의 여부를 확인할 수 있었다.

3.2 실험결과 및 해석

Fig. 4의 사진은 마이크로미터 1만을 이용하여 $40 \mu\text{m}$ 의 최대 면외변위를 발생시켰을 때 얻어진 홀로그래피 간섭무늬와 영의 간섭무늬를 나타내고 있다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 미리 표시해 둔 화살표 표시와 함께 보는 쪽 방향으로 거의 평행을 유지하는 명확한 홀로그래피 간섭무늬가 재생되었다. 사진의 위쪽으로 갈수록 간섭무늬의 간격이 미세하게 좁아지는 것으로 나타나는데 이것은 보의 처짐을 지배하는 식이 3차식으로 표시되기 때문에 자유단으로 갈수록 처짐의 변화율이 점점 커지기 때문이다. 이때 면내변위는 없기 때문에 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 영의 간섭무늬는 나타나

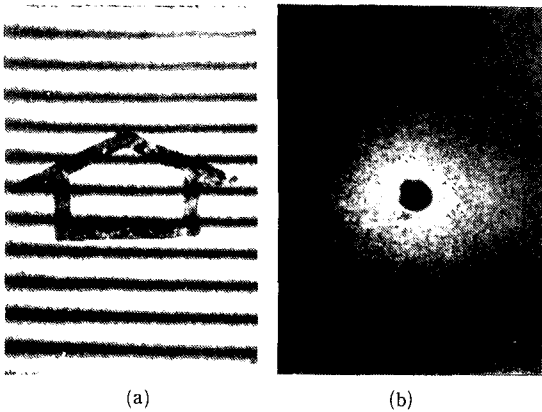


Fig. 4 Holographic fringe pattern(a) and Young's fringe pattern(b) for the out-of-plane displacement (maximum deflection of 40 μm)

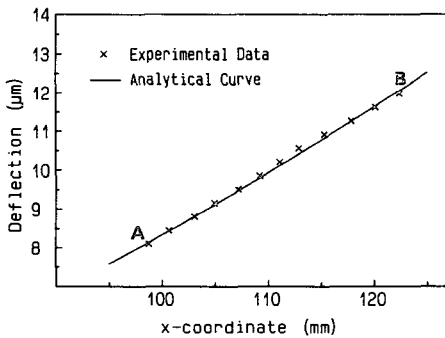


Fig. 5 Deflection of the cantilever beam by experiment and beam theory

지 않았다.

Fig. 5에 Fig. 4(a)에서 나타난 홀로그래피 간섭 무늬를 정량적으로 해석하여 보의 처짐의 결과를 나타내었다. 홀로그래피 간섭무늬에서 평면에 수직 한 방향의 변위의 크기는 다음 식으로 표현할 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$w = \frac{n\lambda}{\cos\beta + \cos\gamma} \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

여기서 λ는 레이저의 파장이고, β는 변위방향에 대한 레이저의 입사각이며 γ는 변위방향과 물체에 서 반사된 빛이 홀로그래피에 진행되는 방향사이의 각도이다. 또한 n은 간섭무늬의 차수를 나타낸다. 본 실험에서 사용된 레이저의 파장은 0.633 μm이며, β와 γ는 각각 37°와 0°이었으므로 고정단으

로부터 간섭무늬 한개가 형성될 때마다 변위는 0.352 μm 씩 증가하는 것을 알 수 있다. 외팔보에 대한 이론해를 적용하여 보면 고정단으로부터의 길이방향의 위치 x에서의 보의 처짐은 마이크로미터 1에 의해 변형된 최대처짐 w_m의 식으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$w_x = \frac{(3L-x)x^2}{2L^3} w_m \quad (3)$$

Fig. 5의 이론식은 식(2)를 95 mm ≤ x ≤ 125 mm 의 범위에서 표시하였으며 실험값은 A지점에서 고정단으로부터 23번째의 간섭무늬가 나타났고 B지점에서 34번째의 간섭무늬가 나타났으므로 x의 위치를 측정하고 간섭무늬 한개당 0.352 μm의 처짐을 계산하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 이론식과 홀로스펙클에 의한 실험값은 잘 일치하였다. 측정된 범위에서 이론값과 측정값과의 최대차이는 x=113 mm 부근에서 1.38%로 나타났다.

Fig. 6의 사진은 마이크로미터 2만을 이용하여 10 μm의 면내변위만을 발생시켰을 때의 홀로그래피 간섭무늬와 영의 간섭무늬를 보여주고 있다. 면내변위가 발생하면 레이저의 경로차이 때문에 홀로그래피 간섭무늬가 생겨날 수 있지만 그 차이가 면외변위의 경우에 비하여 작기 때문에 감도가 떨어질 뿐아니라 간섭무늬의 선명도가 저하된다. 이러한 이유로 Fig. 6(a)와 같은 흐릿하고 넓은 간격의 간섭무늬를 얻게 되었다. 반면에 영의 무늬는 Fig. 6(b)와 같이 변위에 수직한 방향으로 명확하게 얻을 수 있었다.

본 실험에서는 4배로 기록된 상 홀로그래프의 중앙 부분에 레이저 빛을 비추고 L=2000 mm인 지점에 스크린을 설치하여 영의 간섭무늬를 얻었다. 측정결과 간섭무늬의 간격 Δu는 30.8 mm이었으므로 실제 물체의 변위는 다음 식으로 구해질 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$v = \frac{\lambda L}{M\Delta u} = 10.28 \mu\text{m} \quad (4)$$

이것은 실제로 가해진 변위량 10 μm에 대해 2.8%의 오차를 보이고 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 마이크로미터 1과 2에 의하여 보의 처짐과 강제이동을 동시에 발생시켰을 때의 홀로그래피 간섭무늬와 영의 간섭무늬의 변화를 보여주고 있다. Fig. 7은 마이크로미터 1에 의하여 보에 40 μm의 최대처짐을 준 상태에서 마이크로미

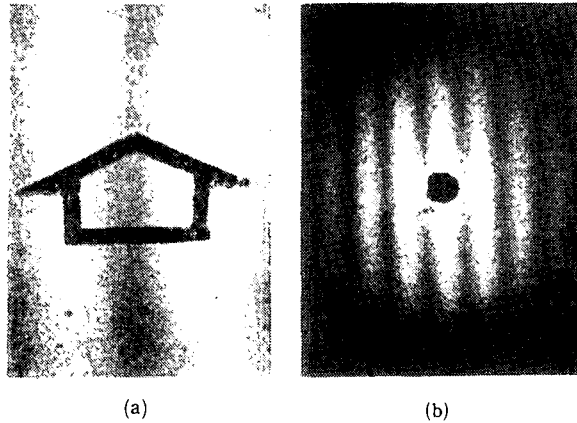


Fig. 6 Holographic fringe pattern(a) and Young's fringe pattern(b) for the in-plane translation of $10\ \mu\text{m}$.

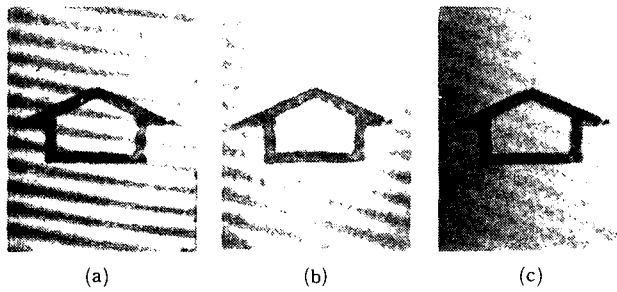


Fig. 7 Holographic fringe patterns due to maximum deflection of $40\ \mu\text{m}$ with variable in-plane translations (a) $5\ \mu\text{m}$, (b) $10\ \mu\text{m}$, (c) $20\ \mu\text{m}$

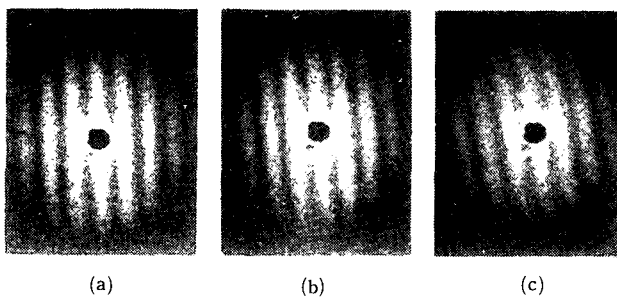


Fig. 8 Young's fringe patterns due to in-plane translation of $10\ \mu\text{m}$ with variable maximum deflections (a) $10\ \mu\text{m}$, (b) $30\ \mu\text{m}$, (c) $40\ \mu\text{m}$

터 2를 이용하여 면내변위를 각각 $5\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$ 로 증가시켰을 때 얻은 홀로그래피 간섭무늬들이다. Fig. 7(a)~(c)에서 간섭무늬 사이의 간격은 크게 다르지 않으나 면내변위가 증가할수록 홀로그래피 간섭무늬의 수평선으로부터의 각도가 증가하고 선명도도 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 앞

에서 설명한대로 면내변위가 홀로그래피 간섭무늬의 선명도를 떨어뜨리기 때문이며 각도가 변하는 이유는 Fig. 6(a)에서와 같이 면내변위 만에 의해서 생겨난 홀로그래피 간섭무늬가 면외변위에 의한 간섭무늬와 벡터합이 이루어진 때문이다. 따라서 홀로그래피 간섭법을 이용하여 평면에 수직인 변위를

측정하려고 하면 평면방향의 강제이동이 없도록 하는 것이 오차를 줄일 수 있다.

Fig. 8은 마이크로미터 2에 의하여 $10\ \mu\text{m}$ 의 평면 강제이동을 가한 상태에서 마이크로미터 1을 이용하여 보의 최대 처짐을 각각 $10\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$, $40\ \mu\text{m}$ 로 증가시켰을 때의 영의 간섭무늬들이다. 처짐이 증가할 수록 간섭무늬의 수직선으로부터의 각도가 커지고 간섭무늬가 S자 형태로 변하는 현상을 볼 수 있다. 각도가 커지는 이유는 강제이동으로 인한 y 방향의 평면상의 변위성분 뿐만 아니라 처짐으로 인한 x 방향의 평면상의 변위성분이 나타나서 변위 벡터합의 각도가 수평선으로부터 기울어지기 때문이다. 간섭무늬가 S자 형태로 변화는 이유는 면의 변위가 증가함에 따라 상 렌즈의 구면수차(spherical aberration)가 증가되기 때문에 나타난 것⁽¹¹⁾이나 간섭무늬의 간격만을 측정하면 변위를 구할 수 있으므로 영의 무늬를 해석하여 면변위를 결정하는데는 영향을 주지 않는다.

4. 볼 압입체의 3차원 변위 측정

두개 이상의 물체가 서로 접촉하여 하중을 받게 되면 접촉부위에 응력집중현상이 나타나서 재료에 파손이 일어날 수 있으며, 국부적인 변형으로 인하여 기계나 구조물의 성능을 저하시킬 수 있다. 오래전부터 이러한 접촉문제에 많은 연구자들이 관심을 가져왔다. 1896년 Hertz⁽¹²⁾에 의하여 접촉문제의 해법이 이론적으로 제시된 이후에 많은 연구자들이 이 문제를 수치적^(13,14)으로 해결하려고 노력하여 왔으며 그 중에는 실제문제에 상당히 유용하게 적용될 수 있는 해법도 개발되었다. 그러나 접촉부위의 복잡성 때문에 실험적으로 변위나 응력을 측정한 연구는 거의 없으며 수치해법의 신뢰성을 확인하기 위해서는 실제적인 측정에 의한 정량적인 해석이 필요하다. 볼 압입시험 문제의 경우 압입되는 물체는 3차원의 변형상태를 나타내며 접촉부위 부근에서는 응력집중으로 인하여 변위의 증가율이 대단히 커진다. 이 경우에 3차원의 변위를 측정할 수 있는 비접촉적인 실험방법이 필요하며, 전체적인 변위의 분포를 알 수 있는 실험방법을 선택하여야 한다.

본 논문에서는 볼 압입으로 인한 압입되는 물체의 3차원적인 변위를 측정하기 위하여 앞에서 설명한 홀로스펙클 간섭법을 응용하였다.

4.1 실험장치 및 방법

접촉변형을 주기 위한 장치로는 광학테이블 위에 설치한 하중발생장치를 사용하였으며 접촉하중은 정밀도 0.05% 이내의 로드셀을 사용하여 정확하게 측정되었다. 하중을 가하는 속도는 1 mm/min로 하였으며 가능한 한 수직하중만이 가해질 수 있도록 볼로 연결된 두개의 평판중 아래 평판에 압입체를 접촉하였다.

압입체와 압입되는 물체는 입자분포가 균일하고 반투명한 아크릴계 고분자 화합물(PMMA)로부터 Fig. 9와 같이 제작하였다. 지름 10 mm 인 반구형의 압입체는 그림과 같이 충분히 큰 압입되는 물체의 한쪽 모서리에 정확하게 위치하도록 하였다. 압입체 바로 아래부분의 물체에 변형이 집중되므로 주로 이 부분을 홀로그램에 기록하였다. 이와 같이 변형이 집중되는 경우에는 본 연구에서 사용한 확대된 상(magnified image)을 얻을 수 있는 광학적 장치가 효과적으로 이용될 수 있다.

4.2 유한요소해석

변형되는 물체의 변위성분을 수치적으로 계산해 내기 위해서는 유한요소법에 기초를 둔 접촉해석을 수행하여 정확한 해를 구하는 방법이 많이 사용되고 있다. 그러나 홀로그래피 방법에서는 두 개의 간섭무늬 사이의 간격이 레이저의 파장보다 작은 변위를 나타내기 때문에 주로 미소변형에 의한 전체 물체의 거동을 결정하는데 유용하게 사용된다. 본 실험에서는 간섭무늬 해석이 가능하도록 압입체

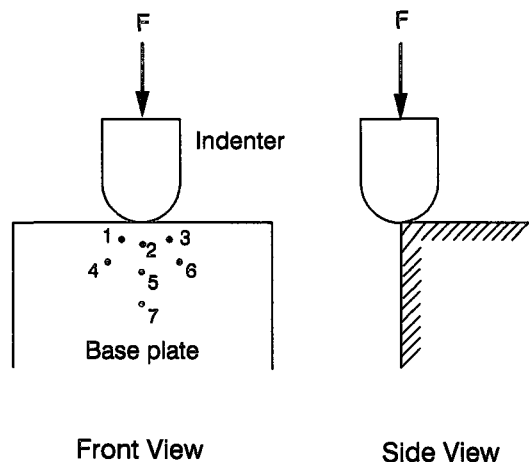


Fig. 9 schematic diagram for ball indentation

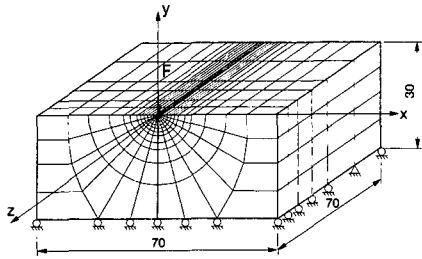


Fig. 10 Finite element mesh for indented plate. Dimensions in mm

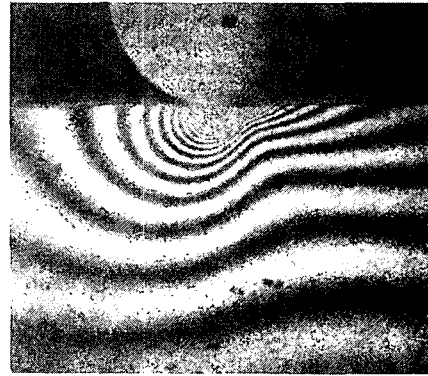
에 60 N의 압축하중을 가하였으며 이를 Hertz의 접촉해석에 의하여 계산한 결과 접촉영역은 반경 0.4 mm의 반원이었다. 따라서 사용한 유한요소격자에서는 접촉해석의 영향이 나타나지 않기 때문에 계산의 편의를 위하여 집중하중에 의한 유한요소해석을 하였다. 유한요소 격자와 치수가 Fig. 10에 나타나 있다.

사용한 유한요소 모델은 8절점 3차원 요소이다. 전체 절점수와 요소수는 각각 1169개와 876개 이었고, 변형이 집중될 것으로 예상되는 압입체 바로 밑부분의 요소를 대단히 조밀하게 구성하였다. 모델의 아래 평면은 모두 y방향으로 변위를 고정시켰다. 물체 윗면 모서리의 중심에는 측정값과의 비교를 위해서 60 N의 집중하중을 가하였다. 재료의 탄성계수와 포와슨비는 실제 물체의 재료상수와 같도록 각각 6.4 GPa과 0.3으로 가정하였다. 유한요소해석에 의하여 모든 절점의 x, y, z 세 방향으로의 변위성분이 모두 계산되었다.

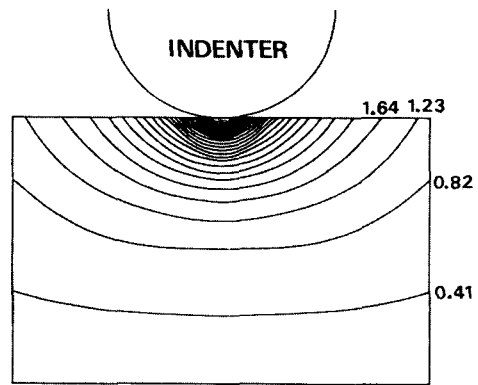
4.3 실험결과 및 해석

Fig. 11(a)의 사진은 60 N 하중이 압입체에 가해졌을 때의 홀로그래피 간섭무늬이다. 홀로그래피 간섭무늬는 상 홀로그래피 방법으로 이중노출하여 얻어졌으며 대단히 선명하게 나타났다. 간섭무늬는 평면에 수직인 방향의 변위성분의 분포를 나타내고 있으며 간섭무늬 사이의 변위는 식(2)에서 표시된 각도가 $\beta=57^\circ, \gamma=0^\circ$ 이었으므로 간섭무늬 한개 사이의 z 방향의 변위는 $0.410 \mu\text{m}$ 가 된다.

간섭무늬에서 보는 바와 같이 접촉변형은 압입체 바로 아래의 좁은 범위에 대단히 집중되어 있다. 간섭무늬는 수직선에 대하여 대칭이 아니고 약간 찌그러진 형태를 나타내었는데 이것은 하중발생장치와 반구의 압입체 사이의 정렬상태가 완벽하지



(a)



(b)

Fig. 11 Distribution of out-of-plane displacement (a) holographic fringe pattern (b) contour by finite element method

않았음을 의미한다. 이와 같은 현상을 이용하여 홀로그래피 간섭무늬를 해석하여 기계 및 시험기의 정렬상태를 감지할 수도 있다. 이에 반하여 수직해석 결과는 Fig. 11(b)와 같이 수직선에 대하여 대칭이고 매끈한 곡선을 보였다. 사진과의 비교를 위하여 z 방향의 변위를 $0.41 \mu\text{m}$ 등간격의 분포로 나타내었다. 두 그림의 형태는 약간 다르지만 절대값은 거의 일치하였다.

홀로그래피 간섭무늬와 유한요소해석에 의하여 정량적으로 구해진 y 좌표의 변화에 따른 z 방향의 변위를 Fig. 12의 그래프에 나타내었다. 변위는 $x=0$ 인 직선과 $x=\pm 2 \text{ mm}$ 인 직선들을 따라서 구해졌다. y축을 따라서 위로 갈수록, 즉 압입체와 가까워질수록 변위는 급격하게 증가하였다. 홀로그래피 간섭법에 의해서는 간섭무늬가 너무 조밀하여

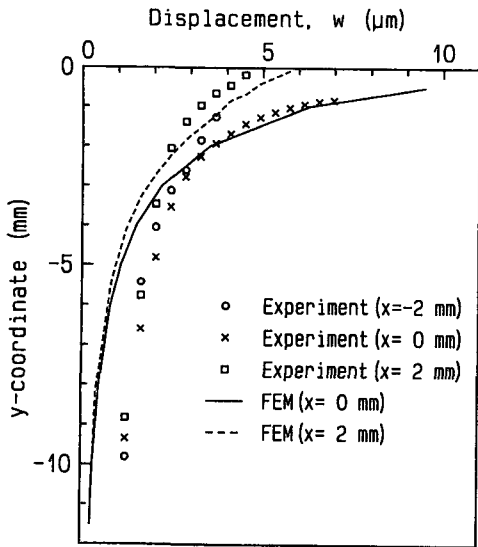


Fig. 12 Distribution of out-of-plane displacement as a function of y-coordinate

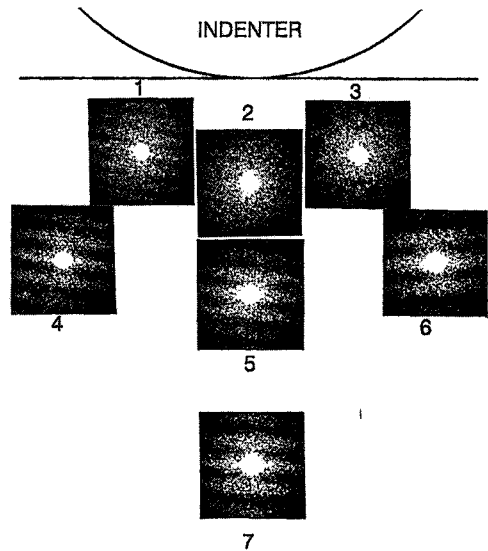


Fig. 13 Young's fringe patterns at seven points due to ball indentation under the load of 60 N

뭉개지는 현상이 나타나서 압입체와 아주 가까운 부분의 측정결과는 얻어질 수 없었다. 실험결과는 $x = -2\text{ mm}$ 인 지점에서 변위가 크게 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 홀로그래피 간섭법에 의한 해석결과와 유한요소 해석결과는 잘 일치하였으나 y 축을 따라 아래로 갈수록 두 결과의 차이가 커졌다. 이것은 물체 밑면의 실제적인 변위 조건과 유한요소 해석에서의 이상적인 변위조건에 차이가 있었기 때문이다.

Fig. 13은 Fig. 9에서 표시한 7지점에서의 영의 간섭무늬를 나타내고 있다. 이와 같은 간섭무늬는 상 홀로그래피 방법에 의하여 기록된 홀로그램의 원하는 지점에 레이저 빛을 비추어 구해진 것이다. 이와 같은 영의 간섭무늬는 평면상의 변위성분에 대한 정보를 가지고 있다. 다시 말하면, 간섭무늬의 간격은 평면상의 변위벡터의 크기를 나타내며 식(3)에서 나타난 바와 같이 간격이 좁을수록 변위의 크기는 커진다. 간섭무늬의 각도는 평면상의 변

Table 1 In-plane displacement component at seven points by speckle photography and finite element method

Position	coordinate (mm)		displacement (μm)			
			speckle photography		FEM	
	x	y	u	v	u	v
1	-2.12	-2.12	-1.25	-7.39	-1.51	-7.62
2	0.	-3.	-0.67	-8.88	0.	-9.58
3	2.12	-2.12	2.40	-5.51	1.50	-7.59
4	-3.54	-3.54	-0.83	-5.31	-1.16	-4.55
5	0.	-5.	-0.52	-5.71	0.	-5.83
6	3.54	-3.54	-0.31	-4.16	1.15	-4.54
7	0.	-8	-0.37	-4.86	0.	-3.32

위벡터의 방향을 나타낸다. 즉, 변위의 방향은 간섭무늬 평행선에 수직인 방향이 된다. 만일에 간섭무늬가 수평선에 평행하다면 평면상에는 수직방향의 변위만이 존재하게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 1지점과 3지점, 4지점과 5지점은 y 축을 중심으로 대칭이어야 하나 완벽하지 않은 하중발생장치의 정렬상태로 인하여 약간 비대칭으로 나타났다. 2지점, 5지점, 7지점의 영의 간섭무늬를 비교해 보면 위로 갈수록 간섭무늬의 간격이 좁아지는 것을 볼 수 있다.

각 지점에서의 영의 간섭무늬의 해석결과와 유한요소 해석결과를 정량적으로 비교하여 Table 1에 나타내었다. 표에서는 x 와 y 방향으로의 변위성분을 각각 구해서 나타내었다. 실험결과를 보면 하중발생장치와 압입체의 완전하지 않은 정렬상태 때문에 $x < 0$ 인 범위에서의 변위의 크기가 $x > 0$ 인 범위에서의 변위의 크기보다 더 크게 나타났다. 또한 $x = 0$ 인 지점에서의 간섭무늬가 수평선에 평행하지 않아서 x 방향의 변위성분이 약간 존재하였다. 홀로스펙클에 의한 해석결과와 유한요소에서의 해석결과는 대체로 잘 일치하였으나, 3지점과 7지점에서는 상당한 차이를 보였다. 3지점에서 홀로그래피 간섭무늬를 보면 대단히 심하게 변하는 현상을 볼 수 있는데 수치해석에서는 이러한 현상을 시뮬레이션하기가 어렵기 때문이다. 7지점에서 y 방향의 변위 v 의 차이가 큰것으로 나타났는데, 이것은 압입되는 물체 밑면의 실제적인 변위 경계조건과 유한요소해석에 의한 이상적인 변위 경계조건에 차이가 있기 때문이다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 개발된 홀로스펙클 방법은 복잡한 3차원의 변형상태를 갖는 물체의 변위를 정량적으로 구하는데 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다. 또한 수치해석 방법은 유한요소 해석결과와도 잘 일치하여서 두 방법을 적절히 조합하여 사용하면 신뢰성 있는 변형해석 및 응력해석이 가능하다.

5. 결 론

홀로그래피 간섭법과 스펙클 사진법을 하나의 광학시스템에 결합시킨 홀로스펙클 간섭법 장치를 구성하여 3차원의 변위측정에 이용하였다. 이론해가 주어진 외팔보의 변형을 이용하여 구성된 홀로스펙클 시스템의 정확도를 평가한 결과, 면외변위는 이

론해와 1.38%의 오차를 보였고, 면내변위는 실제로 가해진 변위와 2.8%의 오차를 보여서 기계나 구조물의 변형해석에 비교적 높은 신뢰성을 가지고 응용될 수 있다. 홀로스펙클 간섭법은 전체평면의 변위분포를 알 수 있는 비접촉적인 광학적 측정방법이기 때문에 고 해상도 영상처리 등의 결과처리 방법을 사용하면 좀더 정확한 변위분포와 변형을 및 응력을 정량적으로 결정할 수 있다.

응용예로 볼 압입문제에 홀로스펙클 방법을 적용하고 측정한 결과를 분석하여 정량적인 3차원 변위 분포를 얻을 수 있었으며, 구해진 실험결과는 유한요소법에 의한 수치해석결과와 전체적으로 잘 일치하였다.

참고문헌

- (1) Ranson, W. F., Sutton, M. A. and Peters, W. H., 1987, "Holographic and Laser Speckle Interferometry," Handbook of Experimental Mechanics, Society for Experimental Mechanics, pp. 388~429.
- (2) Abramson, N., 1981, The Making and Evaluation of Holograms, Academic Press, New Your, pp. 110~155.
- (3) 권영하, 박승욱, 강대임, 1990, "홀로그래피 간섭법을 이용한 터빈 블레이드의 미소변형 측정," 대한기계학회논문집, 제14권, 제4호, pp. 1008~1014.
- (4) Archbold, E., Burch, J. M. and Ennos, A. E., 1970, "Recording of In-plane Surface Displacement by Double Exposure Speckle Photography," Opt. Acta, Vol. 17, No. 12, pp. 883~898.
- (5) 박승욱, 이상수, 1986, "레이저 스펙클을 이용하는 횡변위 측정방법과 종변위 측정방법의 적용 범위에 관한 연구," 새물리, 제25권, 제4호, pp. 423~431.
- (6) Adams., F. D. and Maddux, G. E., 1974, "Synthesis of Holography and Speckle Photography to Measure 3-D Displacement," Applied Optics Vol. 13, No. 2, p. 219
- (7) Li, Q. B. and Chiang, F. P., 1985, "Analysis of Holographic Fringe Formation and Holographic Interferometry," J. Nondestructive Evaluation Vol. 8, No. 2, pp. 77~95.

- (8) Li, Q. B. and Chiang, F. P., 1988, "Study of Holographic Interferometry," *Optical Engineering* Vol. 27, No. 3, pp. 200~206
- (9) Taylor, C. E., *Manual of Engineering Stress Analysis (Chapter 7 Holography)*, Prentice-Hall, pp. 70~76
- (10) Jones, R. and Wykes, C., 1983, *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 124~132.
- (11) Stetson, K. A., 1977, "Vulnerability of Speckle Photography to Lens Abberation," *JOSA* Vol. 67, No. 11, pp. 1587~1590.
- (12) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., 1970, *Theory of Elasticity*, Macgraw-Hill, Toyko, pp. 409~414.
- (13) Chand, R., Haug, E. J. and Rim, K., 1976, "Analysis of Unbonded Contact Problems by Means of Quadratic Programming," *J. Optimization Theory and Application*, Vol. 20, No. 2, pp. 917~930.
- (14) Joo, J. W. and Kwak, B. M., 1986, "Analysis and Applications of Elasto-plastic Contact Problems Considering Large Deformation," *Computers & Structures*, Vol. 24, No. 6, pp. 953~961.