≪해설≫ The Journal of Optical Society of Korea (Korean Edition) Volume 4, Number 4, December 1993

레이저 반점 계측법의 원리와 응용 : I. 레이저 반점 간섭계측법

김 진 승
전북대학교 물리학과

(1993년 11월 8일 받음)

레이저 반점 간섭계측법의 기본원리를 설명하고, 이를 응용하여 물체표면의 이동 및 변형측정 그리고 물체의 고유 진동 모우드를 분석하는 실험장치의 구성과 실험방법을 설명하였다.

I. 서 론

반점무늬(斑點紋: speckle pattern)란 모양이 불규칙한 작은 점들이 제멋대로 흩어져 있는 것처럼 보이는 무늬를 일컫는다. 반점무늬가 생기는 원인은 여러가지인데, 레이저광이 거친 표면에서 산란되어 만드는 무질서한 간섭무늬를 레이저 반점무늬(laser speckle pattern)라고 부르고, 바탕이 흰 표면에 검은 도료를 뿌려 만든 반점무늬를 백색광 반점무늬(white light speckle pattern)라고 부르며, 별빛이 대기권을 지나올 때 대기의 요동에 따라 광경로가 흔들려 만원경의 상평면에 형성하는 반점무늬를 별빛 반점무늬(stellar speckle pattern)라고 부른다.[1,2,3] 특히 거친 표면에 레이저광을 비추었을 때 나타나는 레이저 반점무늬를 두가지로 나누어, 표면에서 산란되어 퍼져나가는 빛이 만든 반점무늬를 회절반점무늬(objective speckle pattern)라고 부르고, 산란된 빛을 렌즈로 모아 물체의 상을 만들 때 그 상평면에 나타나는 반점무늬를 결상반점무늬(subjective speckle pattern)라고 부른다.[1,2] 레이저 반점무늬의 특성은 반점들의 통계적 성질을 써서 나타내는데, 가장 중요한 것은 반점들의 평균적인 크기와 모양, 그리고 콘트라스트(contrast) 등이다. 콘트라스트는 반점무늬 전체의 평균밝기에 대한 각 부분의 밝기의 변화폭(밝기의 표준편차)의 비로 정의된다. 이 변수들은 반점무늬 각 부분에서의 밝기에 대한 확률분포함수가 주어지면 이로부터 직접 셈할 수 있다. 표면이 거친 물체로부터 산란된 레이저광이 만드는 회절반점무늬나 이 빛을 렌즈로 모아 만든 결상반점무늬에서는 반점무늬의 밝기의 확률분포함수가 역지수함수로서 가장 무질서한 분포를 하므로 콘트라스트의 값이 1이 되어 밝고 어두운 부분이 뚜렷이 대비되어 나타난다. 반점의 평균적인 크기는 서로 이웃에 있는 두 점 x와 $x+\Delta x$에서의 반점의 밝기 $I(x)$과 $I(x\Delta x)$의 상관함수의 평균값 $\langle I(x)I(x+\Delta x)\rangle$을 두 점 사이의 거리 Δx에 대한 함수로 나타내어 정의할 수 있는데, 레이저 결상반점의 평균지름 σ는 회절이론으로부터 다음과 같이 결정된다.[1,2,3]

$$\sigma = 1.2\lambda F(1+M) \tag{1}$$

여기에서 λ는 빛의 파장, F는 결상광학계의 수치구경(numerical aperture)으로서 결상렌즈의 초점거리가 f이고 구경의 지름이 A이면 $F=A/f$이고, M은 광학계의 배율이다. 이 식으로부터 광학계의 구경과 배율을 조절하면 반점의 평균지름을 조정할 수 있고, 광학계의 수차와는 무관함을 알 수 있다.

물체가 움직이거나 변형되면 물체의 상에 나타나는 반점들도 이에 따라 이동하며 아울러 반점들의 모양과 위상도 달라진다. 물체의 이동이나 변형이 충분히 작으면 반점들이 모양은 거의 그대로 유지하면서 위치와 위상만이 달라진다. 그러므로 반점들의 위상변화 또는 이동벡터를 재면 물체표면의 이동이나 변형을 결정할 수 있다. 물체표면의 이동이나 변형이 너무 커서 반점들의 모양이 바뀌어 버리면 물체가 이동한 뒤에는 대응되는 반점들을 찾을 수 없으므로 반점의 위치나 위상의 변화로부터 물체표면의 이동벡터를 결정하는 방법을 쓸 수 없다. 그러므로 반점 계측법을 써서 잴 수 있는 물체표면의 이동거리와 변형율의 크기는 반점들의 변형에 따

르는 반점무늬의 상관도 감소에 의해 제한된다. 레이저 반점을 써서 물체표면의 움직임을 재려할 때 반점들이 상평면에서 움직인 거리가 반점들의 평균지름보다 큰가 작은가에 따라 반점들의 이동거리를 재는 방법이 다르다: 반점들이 움직인 거리가 반점의 평균지름보다 작으면 레이저 반점 간섭계측법(laser speckle interferometry)을 쓰고, 반점의 평균지름보다 크면 레이저 반점 사진계측법(laser speckle photography)를 쓴다. 레이저 반점 간섭계측법과 레이저 반점 사진계측법은 홀로그래피 간섭계측법과 함께 물체표면의 미소한 움직임과 변형 측정, 물체표면의 고유진동모우드를 분석, 그리고 유체의 흐름에서 유속분포 측정에 쓰인다. 이 글에서는 레이저 반점무늬를 써서 물체표면의 미소한 움직임이나 변형들을 재는 반점 계측법의 원리와 이의 응용을 설명하는데, 지면의 제한으로 글을 두 부분으로 나누어 첫번째 글에서는 물체 표면의 이동이나 변형의 크기가 비교적 작을 때 쓰는 방법인 레이저 반점 간섭계측법을 설명하고 두번째 글에서는 물체 표면의 이동이나 변형의 크기가 비교적 클 때 쓰는 레이저 반점 사진계측법을 설명한다.

II. 레이저 반점 간섭계측법[1,2,4]

물체표면의 이동이나 변형이 아주 작아 상평면에서의 반점들의 이동거리가 반점들의 평균거리보다 작은 경우에는 레이저 반점 간섭계측법을 써서 반점들의 이동거리를 잴 수 있다. 먼저 표면에 대한 법선방향의 이동이나 변형을 재는 방법을 설명하겠다. 실험장치는 그림 1 에 보인 것 처럼 Michelson 간섭계와 비슷한데, 다만 양쪽에 있던 거울대신에 한 쪽에는 고정된 기준면을 두고, 다른 쪽에는 움직이는 물체를 둔다. 상평면에는 기준면과 물체표면에서 반사된 빛이 형성하는 두 반점상이 겹쳐지고 따라서 이 두 반점상이 간섭하여 새로운 반점무늬가 나타난다.

두 반점상이 겹쳐져서 간섭하여 만든 반점무늬의 성격을 살펴보자. 기준면의 반점상과 물체표면의 반점상과 연관된 양에는 각각 지수 1과 2를 붙여서 구별하기로 한다. 각 반점상은 밝게 나타나는 곳(B_1, B_2)과 어둡게 나타나는 곳(D_1, D_2)으로 이루어진다. 두 반점상이 간섭하여 만드는 반점무늬에서 밝게 나타나는 곳은 두 반점상 가운데 하나만이 밝게 나타나는 곳(D_1+B_2와 B_1+D_2)과 두 반점상 모두에서 밝게 나타나는데 위상이 같아서 보강간섭을 이루는 곳(B_1+B_2)이고, 어둡게 나타나는 곳은 두 반점상 모두에서 어둡게 나타나는 곳(D_1+D_2)과

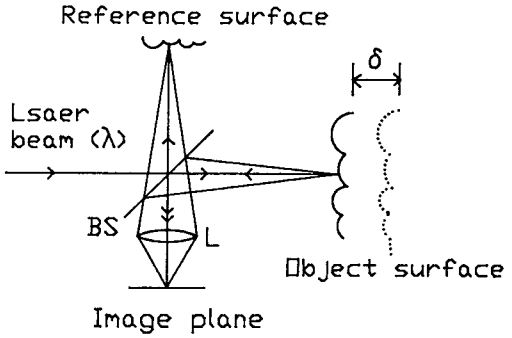

그림 1. 법선방향의 이동벡터를 재는 반점 간섭계측장치의 개략도.

두 반점무늬 각각은 밝게 나타나는데 위상이 서로 어긋나서 겹쳐지면 소멸간섭을 일으켜 어둡게 나타나는 곳(B_1-B_2)이다. 이제 물체가 변형되거나 이동하여 표면 위의 어느 한점이 법선방향으로 δ만큼 움직였다고 하자. 기준면은 전혀 움직이지 않았으므로 기준면의 반점상은 진폭과 위상의 분포가 달라지지 않는다. 그러나 물체표면의 반점상은 물체가 이동한 다음에도 상관도가 잘 유지된다면 반점무늬의 진폭분포(반점들의 모양과 위치에 해당한다)는 거의 달라지지 않지만 각 반점의 위상은 대응되는 물체표면의 각 부분의 이동거리에 비례하여 다음의 양 $\Delta\varphi$만큼 달라진다.

$$\Delta\varphi=\frac{4\pi}{\lambda}\delta \tag{2}$$

따라서 두 반점상이 겹쳐져서 간섭하여 만든 반점무늬의 밝기분포가 달라진다. 물체표면의 반점상에서 표면의 움직임 때문에 반점의 위상이 π의 짝수배만큼 달라진 곳에서는 간섭하는 두 반점상의 간섭조건이 달라지지 않으므로 반점무늬도 표면이 움직이기 전과 똑같다. 그러나 위상이 π의 홀수배만큼 달라진 곳에서는 표면이 이동하기 전에는 기준면의 반점들과 보강간섭하여 밝은 반점을 만들었던 곳은 완전히 어두워지고, 소멸간섭하여 완전히 어두웠던 곳은 아주 밝아진다. 따라서 물체표면이 이동하기 전과 이동한 뒤의 반점상의 밝기분포의 차이를 셈하면 표면의 이동으로 물체표면의 반점상의 위상이 π의 홀수배만큼 달라진 곳들의 일부만이 밝게 나타난다. 위상이 π의 홀수배만큼 달라진 곳 모두가 밝게 나타나지는 않는 까닭은 앞에서 설명한 바와 같이 기준면의 반점상의 어두운 곳과 겹쳐진 반점들은 간섭할 상대가 없으므로 반점무늬의 밝기분포가 위상이 변하기 전과

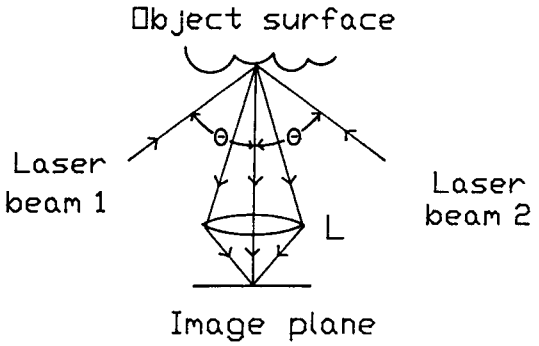

그림 2. 접선방향의 이동벡터를 재는 반점 간섭계측장치의 개략도.

똑같기 때문이다. 그러므로 이 과정을 통해 얻어지는 상관간섭무늬의 콘트라스트는 대략 0.5를 넘지 못한다. 광학계를 잘 배열하여 반점들의 위상이 물체표면에 대한 접선방향의 이동에 민감하게 변화하도록 하면, 물체표면에 나란한 방향의 이동이나 변형도 잴 수 있다. 그림 2는 물체표면에 대한 법선을 중심으로 양쪽에서 대칭적으로 레이저 광을 비추어 줌으로써 가로 방향의 변형만을 민감하게 잴 수 있도록 꾸민 실험장치이다.

물체표면이 임의의 방향으로 이동한다고 하고 이 때의 위상변화를 셈해보면 다음과 같이 가로방향의 이동벡터에 의해서만 위상이 달라짐을 알 수 있다.

$$\Delta\varphi=\frac{4\pi}{\lambda}\,d\cdot\sin\theta \tag{3}$$

여기에서 d는 대칭을 이루는 두 레이저 광이 이루는 평면방향의 이동벡터의 성분이고 θ는 물체표면을 비추는 두 레이저 광이 물체표면의 법선과 이루는 각이다. 두 반점상의 밝기분포에 대한 빼기연산은 사진필름에 기록되는 화상의 투과도가 화상의 밝기와는 반대가 되는 특성을 써서 쉽게 실현할 수 있다. 물체가 변형되기 전의 반점상이 기록된 사진필름에는 밝은 반점이 있던 곳은 까맣게 되어 투과도가 낮고 반점이 없어 어두웠던 곳은 투명하게 되어 투과도가 높다. 따라서 이 반점상이 기록된 사진필름을 정확하게 제 자리에 두면 이 필름을 지나오는 빛은 거의 없게 된다. 이제 물체가 변형되면, 기준면의 반점상과 물체표면의 반점상이 애초에는 소멸간섭을 일으켰었는데 물체의 변형 때문에 보강간섭을 일으켜 밝아진 곳에서는 빛이 사진필름을 통과하여 밝게 나타난다. 이러한 무늬는 물체의 변형에 따라 반점무늬의 상관도가 변한 정도를 나타내므로 상관간섭무늬(correlation interference fringe)라고 부르는데, 변형의 정도가 같은 부분들이 밝기가 같은 상관간섭무늬로서 나타난다. 두 반점상의 밝기분포를 빼주는 대신 더해주어도 상관간섭무늬를 얻을 수 있다. 두 반점상을 더해주면 물체표면의 이동으로 물체의 반점상의 위상이 π의 홀수배만큼 달라진 곳들 가운데 애초에는 어두웠던 곳이 밝아지고 밝았던 곳이 어두워지는 부분에서는 반점상의 밝기의 확률분포가 달라진다. 그 까닭은 원래의 두 반점상 각각의 밝기에 대한 확률분포는 역지수 함수인데, 두 반점상을 더해주면 어두웠다가 밝은 반점으로 채워지는 곳과 밝은 반점으로 채워졌다가 어두워지는 곳들 때문에 완전히 어두울 확률이 많이 줄어들기 때문이다. 따라서 두 반점상을 더하면 물체반점상에서의 반점들의 위상변화가 π의 짝수배만큼 달라진 곳, 그리고 π의 홀수배만큼 달라진 곳들 가운데 기준면의 반점상과 밝고 어두운 곳을 서로 보완하여 겹쳐진 부분에서는 반점무늬의 밝기분포에 대한 확률밀도함수가 역지수 함수꼴을 그대로 유지하고, π의 홀수배만큼 달라진 곳들 가운데 기준면의 반점상과 밝고 어두운 곳이 똑같이 겹쳐진 부분에서는 반점무늬의 밝기분포에 대한 확률밀도함수에서 아주 어두운 부분과 아주 밝은 부분의 확률이 줄어들어 밝기분포가 비교적 고르게 된다. 이러한 밝기분포의 변화를 더 선명하게 보려면 두 반점상을 더한 결과를 광학적으로 푸리에 변환하여 공간주파수 성분들 가운데 저주파(또는 고주파)성분만을 여과시킨 다음 이것을 다시 푸리에 역변환하면 확률분포가 달라진(또는 달라지지 않은) 부분의 반점상만 재생되어 나타난다. 반점상을 더하여 얻은 상관간섭무늬는 빼기 연산을 하여 얻은 무늬에 비해 선명도가 떨어지지만, 사진필름 등을 이중노출시켜 반점상을 겹쳐 기록하면 두 반점상의 밝기가 더해지므로 실험적으로는 반점상의 밝기분포를 빼주는 방법보다 더 쉽게 실현할 수 있다. 다만 이 경우에는 사진필름에 기록된 반점상을 광학적 푸리에 변환하여 공간주파수 여과를 한 다음에 다시 푸리에 역변환하는 번거로운 과정이 뒤따라야 한다. 반점상을 더하는 방법은 특히 물체표면의 고유진동모우드를 분석하는 데 쓸모가 있다. 물체의 진동주파수는 흔히 아주 높아서 반점상을 기록하기 위해 결상계를 통해 빛을 받아들이는 아주 짧은 기간 동안에도 물체표면은 여러차례 진동한다. 따라서 일반적인 실험조건에서는 물체표면의 진동 모우드를 살펴보기 위해 사진필름등에 기록한 반점상에는 진동면의 반점상이 여러 주기에 걸쳐 더해진다. 이 경우에는 각 반점의 위상변화는 그 반점에 대응되는 물체표면의 진폭과 진동주

파수 그리고 빛을 비추어주는 조건에 따라서 달라진다. 물체가 고유진동을 하면 표면에 정상파(standing wave)가 형성되는데, 마디를 이루는 부분은 거의 움직이지 않으므로 반점무늬가 시간에 따라 달라지지 않지만 배를 이루는 부분은 진폭이 반주기마다 최대가 되고 이에 따라 반점무늬가 크게 달라진다. 여러 주기에 걸쳐 이 반점무늬가 기록되면 마디를 이루는 부분에서는 밝기에 대한 확률밀도함수가 역지수함수 그대로 있어 콘트라스트가 1인데 반해, 배를 이루는 부분은 전혀 다른 반점무늬의 밝기분포를 그대로 더해준 셈이 되어 어두운 부분의 비율이 줄어들고 따라서 콘트라스트가 작아진다. 간섭항의 위상인자는 표면의 진동에 따라서 달라지므로 한 주기에 대해 적분하면 다음과 같은 꼴이 된다.

$$\frac{1}{T}\int_0^T dt\cdot\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}a_0\cos\omega t+\phi\right)=J_0\left(\frac{4\pi}{\lambda}a_0\right)\cdot\cos\phi \quad (4)$$

a_0는 그 부분에서의 물체표면의 진폭이고 J_0는 0차 베셀함수이다. $\langle\cos\phi\rangle=0$이므로 어느 곳에서나 간섭항의 평균값은 같지만 콘트라스트는 진폭의 크기 a_0에 따라서 0차 베셀함수의 제곱에 비례하여 달라진다. 특히 $4\pi a_0/\lambda$가 0차 베셀함수의 근이 되는 곳에서는 콘트라스트가 최소가 되므로 반점무늬의 콘트라스트의 변화로부터 각 부분의 진폭의 크기를 알 수 있다. 레이저 반점 간섭계측법에서는 물체표면이 이동하여도 반점상에서의 반점들의 위치나 모양은 거의 변하지 않고 위상만이 변하는 것을 가정하고, 이 위상의 변화로 나타나는 반점상의 상관도 변화를 영상처리기법을 써서 추출하여 이동벡터의 크기를 결정한다. 그런데 물체표면의 이동에 따라 반점들이 이동한 거리가 반점들의 평균크기와 비슷하거나 더 커지면 물체표면이 이동하기 전과 이동한 뒤에 얻은 두 반점상에서 짝을 이루는 반점들의 위치가 서로 어긋나게 된다. 서로 대응되는 반점짝들의 위치가 어긋나 있는 두 반점상을 그대로 겹쳐서 위상을 비교하면 서로 다른 두 반점들의 위상을 비교하는 셈이 된다. 레이저 반점무늬를 이루는 각각의 반점들의 특성은 통계적으로 서로 독립이고, 제멋대로 변화하므로 서로 다른 반점들은 모양과 위상 그리고 위치의 상관관계가 전혀 없다. 따라서 서로 다른 반점들이 겹쳐지는 두 반점상에 대해서는 레이저 반점 간섭계측법을 쓸 수 없고, 레이저 반점 사진계측법을 써야하는데 이에 관한 설명은 다음호에 실릴 글에서 설명한다.

III. 전자반점 간섭계측법(Electronic Speckle Pattern Interferometry: ESPI)[5,6,7]

레이저 반점 간섭계측법을 실제로 쓸 때 가장 불편한 점은 측정하는데 시간이 오래 걸리는 것인데, 이는 주로 사진필름을 현상하는데 필요한 시간 때문이다. 사진필름 대신 최근에 보급되고 있는 CCD(電荷結合素子: Charge Coupled Device)를 쓰면 반점상의 밝기분포를 짧은 시간(대략 1/30초 이하)에 전기신호로 바꿀 수 있다. CCD를 써서 얻은 전기신호를 디지탈 신호로 바꾸어 소형 컴퓨터에 저장한 다음에 적절한 컴퓨터 연산과정을 써서 반점상을 처리하여 물체표면의 변형을 분석하는 전자반점 간섭계측법은 모든 측정을 빨리 할 수 있으므로 짧은 시간에 일어나는 변형이나 이동을 재는데 적당하다. 그림 3은 전형적인 전자반점 간섭계측장치의 구성도이다.

CCD는 사진필름에 비해 반점상을 빨리 기록할 수 있는 장점이 있는 대신에 전형적인 단위화소의 크기가 약 10 μm×10 μm이므로 해상력이 약 1,000 lines/mm에 이르는 사진필름보다 못하며, 하나의 화소에 많아야 하나의 반점이 들어가도록 해야 하므로 결상계의 구경이 아주 작게 제한된다. 반점상을 판독하여 이동이나 변형율 분포를 추출하는 과정에서는 사진필름에 반점상을 기록했을 경우에는 광학적인 연산처리과정을 거치는데, CCD를 써서 디지탈 신호로 바꾸어 저장한 경우에는 컴퓨터를 써서 단순한 덧셈, 뺄셈 등의 대수연산과 푸리에변환은 물론이고 신호대 잡음비를 높여 간섭무늬가 더 선명하게 나타날 수 있도록 하는 여러가지 연산들을 광학적 방법에 비해 훨씬 쉽고 다양하게 할 수 있다. 요 몇년 동안 CCD 사진기의 값은 점점 내려가고, 컴퓨터의 가격대 성능비도 높아지고 있다. 따라서 전자반점 간섭계측기가 개발되던 1970년대에 비해 실험장치의 구성비용이 크게 줄어 지금은 512×512 화소의 CCD를 접속시킨 소형 컴퓨터(PC/486)를 써서 실험장치를 구성하는데 약 500만원 정도가 든다. 앞으로 CCD의 가격과 소형컴퓨터의 가격이 더욱 낮아지면 각 실험실에서 1024×1024 또는 2048×2048 화소의 CCD 사진기를 접속시킨 workstation도 마련할 수 있을 것이다. 이렇게 되면 현재의 전자반점 간섭계측장치를 써서 재고 있는 진동모우드 분석과 법선방향의 이동벡터를 잴 때 CCD 화소의 크기 때문에 제한된 공간분해능이 더 좋아질 것이고, workstation의 뛰어난 계산 및 graphic 성능을 써서 상관간섭무늬를 지금보다도 훨씬 선명하게 보여줄 수 있을 것이므로 변형분석과 고유진동모우드의 탐색이 더욱 쉽게 이루어 질 것이다. 전자반점 간섭계측기에서는 반점상을 기록하는데 CCD를 쓰기 때문에 반점상을 사진필름에 기록하는 경우와는 달리 다이오드 레이저를 광원으로 쓸 수 있다. 다이오드 레이저에서 나오는 빛의 주된

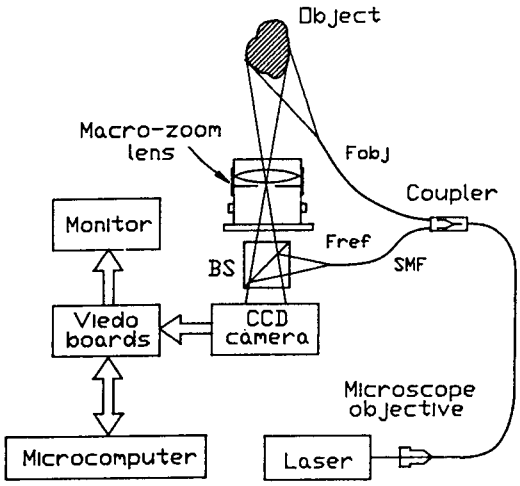

그림 3. 전형적인 전자반점 간섭계측장치의 구성도.

파장은 650, 780, 830~850 nm 등인데, 이 가운데 파장이 650 nm인 레이저 다이오드는 가시광 영역에 있어 사진 필름에도 기록할 수 있지만 파장이 보다 긴 레이저 다이오드에 비해 출력이 약하고 값도 비싸다. CCD의 분광감도는 파장이 900 nm 부근인 빛에 대해 가장 좋기 때문에 파장 780, 830~850 nm인 빛이 나오는 다이오드 레이저와 잘 맞는다. 다이오드 레이저는 다른 레이저에 비해 아주 작고 전력소모도 작기 때문에 장치구성과 운용이 쉽다. 특히 다이오드 레이저를 펄스 모우드로 작동시키면 레이저 펄스의 폭과 주기를 쉽게 조절할 수 있어 변형이 비교적 빠르게 진행되는 것도 잴 수 있다. 반점 간섭계측법에서 상관간섭무늬의 선명도가 떨어지는 가장 중요한 원인은 반점들의 상관도 저하인데, 이는 주로 공기의 대류운동과 물체의 열팽창 그리고 바닥면의 진동 등에 의한 물체 표면의 흔들림 때문이다. 이러한 요소들의 영향을 줄이는 좋은 방법은 비교할 두 반점상을 기록하는 시간차를 아주 짧게 줄이는 것인데, 최근에 레이저 다이오드를 펄스 모우드로 작동시키고 아주 짧은 시간안에 물체가 변형되게 함으로써 선명한 간섭무늬를 얻을 수 있음이 보고되었다.[8] 다이오드 레이저와 광섬유를 결합시켜 광학계를 구성하면 상황에 따라서 광학계를 재배치하는 일이 아주 쉬워진다. 앞으로는 레이저 다이오드와 광섬유 그리고 CCD와 컴퓨터가 더 값싸게 보급될수록 이들로 구성된 전자 반점 간섭계측장치가 더 널리 쓰이게 될 것이다.[8,9]

IV. 맺는말

레이저 반점 간섭계측법은 물체표면의 미소한 움직임이나 변형, 진동을 재는 방법으로 실험기법과 장치가 단순하면서도 측정결과가 상당히 정밀하다. 이 방법은 빛을 이용하므로 대상물체와 접촉하지 않고서도 측정할 수 있어서 온도, 압력, 주변의 조명상태 등 여러가지 작업조건이 험한 곳에서도, 그리고 멀리 떨어져 있는 등의 이유로 물리적인 접근이 어려운 물체에 대해서도 쓸 수 있다. 반점상을 기록하는데 쓰이는 광학계는 사용조건에 맞게 측정감도, 측정량 등을 바꾸어줄 수 있다. 특히 CCD와 소형컴퓨터를 결합시킨 전자반점 간섭계측장치는 반점상의 기록과 분석을 즉시 할 수 있으므로 실제 현장에서 반점 간섭계측법을 쓰는데 크게 도움이 된다. CCD와 소형컴퓨터가 성능은 좋아지면서도 값은 계속 내려가고 있으므로 앞으로는 이들을 써서 구성한 전자반점 간섭계측장치가 물체의 변형측정과 분석에 더 널리 이용될 수 있도록 연구를 많이 하는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

[1]. 이상수, 레이저 스펙클과 홀로그라피, 교학연구사 (1988).

[2] J. C. Dainty, ed., *Laser Speckle and Related Phenomena* (Springer Verlag, Berlin, 1984).

[3] J. C. Dainty, "The Statistics of Speckle Patterns," in *Progress in Optics*, E. Wolf, ed. (North-Holland, Amsterdam, 1977), Vol. XIV. 4.

[4] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, second edition (Cambridge University Press, London, 1989).

[5] O. J. Lokberg, J. Acoust. Soc. Am. **75**, 1783(1984).

[6] K. Creath and G. A. Slettemoen, J. Opt. Soc. Am. **A2**, 1629 (1985).

[7] M. Owner-Petersen, J. Opt. Soc. Am. **A8**, 1082 (1991); Appl. Opt. **30**, 2730 (1991).

[8] B. F. Pouet and S. Krishinaswamy, Opt. Eng. **32**, 1360 (1993).

[9] D. J. Anderson, J. D. Valera, and J. D. C. Jones, J. Meas. Sci. Technol. **4**, 982 (1993).

Principles and Applications of Laser Speckle Metrology : I. Laser Speckle Interferometry

Jin Seung Kim
Department of Physics, Chonbuk National University, Chonju 560-756, Korea

(Received: November 8, 1993)

We review the basic principles of laser speckle interferometry and its applications to the measurement of surface displacement and deformation and to the analysis of resosnant vibrational modes.