

레이저 반점 계측법의 원리와 응용: II. 레이저 반점 사진계측법

김진승

전북대학교 물리학과

(1993년 11월 8일 받음)

레이저 반점 사진계측법의 기본원리와 이를 응용하여 물체표면의 이동 및 변형을 측정하거나 유체의 속도분포를 재는 실험장치의 구성과 실험방법을 설명하였다.

I. 서 론

이 글에서는 지난 호에 실린 레이저 반점 간접계측법의 원리와 응용에 관한 설명^[1]에 이어 레이저 반점 사진계측법의 원리와 이를 이용하여 물체표면의 이동과 변형 그리고 유체의 속도와 흐르는 모양을 살펴보는 방법에 대해 설명한다.

물체가 표면에 대해 나란히 이동한 거리가 충분히 커지면 결상광학계의 상평면에 형성되는 반점상에서 반점들의 전체적인 모양은 그대로 유지되지만 이동거리는 반점들의 평균지름보다 크게 된다. 이러한 상황에서는 물체가 이동하기 전과 이동한 뒤의 두 반점상에서 서로 상관된 반점들이 겹쳐지지 않으므로 레이저 반점 간접계측법으로는 이동벡터의 분포를 보여주는 간섭무늬를 얻을 수 없다. 이 경우에 쓰이는 방법이 레이저 반점 사진계측법으로서 물체가 변형되기 전과 변형된 뒤의 두 반점상을 사진필름에 기록한 다음, 이 두 반점상을 비교하여 대응되는 반점쌍들의 이동벡터를 재어 물체 표면의 각 부분의 이동벡터의 분포를 결정한다. 반점쌍들의 이동벡터를 재는 방법은 원리적으로는 반점상이 기록된 필름을 겹쳐두고 현미경으로 보면서 모양이 비슷한 반점쌍들을 찾아내어 짝을 이루는 두 반점 사이의 거리를 재면 되겠지만, 실제로 이러한 방법을 쓰는 것은 어렵고 빛의 회절과 간섭을 이용한 광학적인 판독법을 쓴다.^[2,4] 이 방법은 물체 표면의 움직임뿐 아니라 유체의 속도 분포를 재거나 흐르는 모양을 살펴보는 데도 그대로 쓰일 수 있다.

II. 레이저 반점 사진계측법

레이저 반점 사진계측법은 물체 표면에 레이저광을 비추어 주어 생기는 반점상을 사진필름에 기록하는 과정과 이 사진필름에 기록된 반점들의 이동을 읽어내는 과정의 두 단계를 거친다. 반점상을 사진필름에 기록하는 방법에는 물체의 이동 전, 후의 반점상을 한장의 사진 필름에 겹쳐 기록하는 이중노출 반점사진계측법(double exposure speckle photography),^[2,4] 반점상이 똑같은 것 두개가 생겨, 약간 비껴 겹쳐지면서 형성한 반점상의 전단간섭무늬를 물체가 이동하기 전과 이동한 후의 두 상황에서 겹쳐 기록하는 반점 전단간섭 사진계측법(speckle shearography),^[5,6] 그리고 물체가 이동하기 전과 이동한 다음의 반점상을 각각 다른 사진필름에 기록하여 두 반점사진판을 겹쳐 비교하여 반점들의 이동을 재는 두 반점사진판 계측법(dual plate speckle photography)^[7]의 세가지가 있다. 반점사진을 판독하는 방법에는 반점상의 어느 한곳에 가느다란 레이저 빛다발을 비추어 그 곳에서의 반점들의 이동을 재는 점판독법(pointwise reading method)과 공간주파수 여과법을 써서 반점상 전체에서의 반점들의 이동벡터의 분포를 읽어내는 전면 판독법(whole field reading method)이 있으며,^[2,4] 상황에 따라서는 헤테로다인 기법이나 위상이동기법을 써서 측정 정밀도를 높일 수 있다.^[8,12]

1. 이중노출 반점 사진계측법^[2,4]

이 방법에서는 물체가 변형되기 전과 변형된 다음의 반점상을 한장의 사진필름에 겹쳐 기록하므로 방법이 단순하고 따라서 가장 많이 쓰인다.

물체표면의 어느 한점의 이동벡터를 알고자 하면 반점상을 겹쳐 기록한 사진필름에서 그 점에 대응되는 곳에

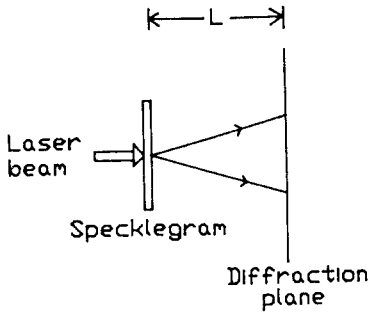


그림 1. 점판독 장치.

그림 1과 같이 가느다란 레이저 빛다발을 사진필름에 수직하게 비추어 준다.

레이저 빛다발은 사진필름에 기록된 반점무늬 때문에 회절되어 동그란 회절광륜(廻折光輪: diffraction halo)을 만드는데 레이저 빛다발이 비추어진 부분에 있는 여러 반점들 가운데 모양이 똑같고 위치만이 다른, 짝을 이루는 반점들이 회절시킨 빛들은 서로 간섭하여 다음과 같은 영의 간섭무늬(Young's fringe)를 회절광륜 속에 만든다

$$I(x) = I_0(x) \left[1 + C(x, d) \cos \left(2\pi \frac{d \cdot x}{\lambda L} \right) \right] \quad (1)$$

여기에서 $I_0(x)$ 는 반점상 하나가 만드는 회절광륜의 밝기분포이고, $C(x, d)$ 는 두 반점상의 상관도이다. d 는 반점들의 이동벡터이며, λ 는 반점사진을 읽어내는데 쓰는 레이저 빛다발의 파장이고, L 은 반점상을 겹쳐 기록한 사진필름에서 회절평면까지의 거리이다. 이 간섭무늬의 방향은 반점들의 이동방향과 같고, 간섭무늬의 간격은 반점들의 이동거리에 반비례한다. 따라서 회절광륜 속에 나타나는 영의 간섭무늬의 방향과 간격으로부터 반점들의 이동벡터를 알 수 있고, 이로부터 다시 물체표면의 이동벡터를 알 수 있다. 이 방법은 간단하고 비교적 정밀하다. 그러나 물체표면 전체에 걸친 이동벡터의 분포를 알고자 할 때는 여러 곳에 차례로 레이저 빛다발을 비추어가며 판독하는 일을 되풀이 해야 하므로 시간이 오래 걸린다. 따라서 소형 컴퓨터를 써서 판독과정을 자동화 하기도 한다.^[13,14] 영의 간섭무늬의 방향과 간격을 쟈 때는 흔히 간섭무늬의 차수가 정수 또는 반정수가 되는 곳, 다시 말하면 무늬가 가장 밝은 곳과 가장 어두운 곳을 찾아내는데 이 때 오차가 많이 들어가며 간섭무늬가 흐릴 때는 특히 오차가 더 커진다. 이차원 배열 광다이오드(2-D photodiode array) 또는 CCD를 써서 간섭무늬가 만

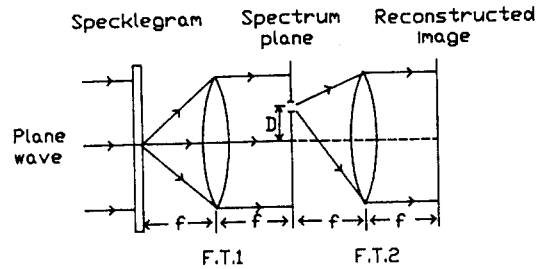


그림 2. 전면판독장치의 개략도.

들어진 회절광륜의 밝기분포를 전기신호로 바꾸고, 이것을 소형 컴퓨터를 써서 이차원 푸리에 변환하여 공간주파수 스펙트럼이 가장 큰 값을 가지는 성분을 찾아내면 반점무늬의 상관도 저하로 간섭무늬가 흐려져서 눈으로 보아서는 간섭무늬를 읽어내기 힘든 경우에도 간섭무늬의 방향과 간격을 상당히 정확히 결정할 수 있다.^[15]

물체표면 전체에 걸친 이동이나 변형의 분포를 빨리 살펴보는 데는 점판독법은 시간이 오래 걸리므로 적당하지 않으므로 반점사진 전체에 걸친 이동벡터의 분포를 한번에 살펴보는 전면판독법을 쓰고자 할 때는 그림 2와 같이 장치를 꾸며 반점사진을 읽어낸다.

렌즈 FT1은 반점상이 회절시킨 빛을 푸리에 변환시켜 렌즈의 후방 초평면에 공간주파수 성분들을 나누어 보여주고, 렌즈 FT2는 이 공간주파수 성분들을 다시 푸리에 역변환시켜 후방초평면에 반점상을 재생시킨다. 모양이 같고 위치가 다른 두 반점무늬의 공간주파수 스펙트럼은 진폭은 같으나 위상이 다르므로 두 공간주파수 성분들이 겹쳐지는 공간주파수 평면에는 점판독법에서 본 것과 같은 영의 간섭무늬가 나타나는데, 각 반점쌍들이 만드는 간섭무늬들이 겹쳐져 나타난다. 이제 이 평면에 작은 구멍을 낸 판을 두면 구멍이 있는 곳에 영의 간섭무늬의 밝은 부분이 생기는 '반점쌍들이 회절시킨 빛은 구멍을 빠져 나가고, 간섭무늬의 어두운 부분이 생기는 반점쌍들이 회절시킨 빛은 구멍을 빠져 나가지 못한다. 공간주파수 평면에 방향과 간격이 같은 영의 간섭무늬를 만드는 반점쌍들로부터 회절된 빛은 구멍을 통해 빠져나가는 빛의 양이 같으므로 이 빛을 푸리에 역변환시켜 재생시킨 반점상에는 밝기가 같은 줄무늬를 만든다. 따라서 재생된 반점상에서 서로 이웃한 두 줄무늬에 있는 반점들의 이동벡터의 차이 δd 는 다음과 같다.

$$\delta d = \frac{\lambda f}{D} \quad (2)$$

여기에서 D 는 공간주파수 평면에 있는 여과구멍의 위치이다. 재생상에 생긴 줄무늬 간격이 조밀한 부분은 변형율이 큰 곳이므로 전면판독법을 쓰면 변형이 집중되는 곳을 쉽게 찾아낼 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 공간주파수 성분 가운데 일부만을 쓰기 때문에 정밀도가 높지 않아서 정량적 분석에는 적당하지 않다.

실제 상황에서 물체가 변형될 때의 이동벡터는 표면에 대한 접선방향성분과 법선방향성분이 있으므로 완전한 분석을 하려면 두 성분 모두 재야한다. 반점사진 계측법을 쓰면 물체표면에 대한 접선방향의 이동은 켈 수 있지만 법선방향의 이동은 켈 수 없다. 이에 비해 홀로그래피 간섭계측법은 물체표면에 대한 법선방향의 이동은 정밀하게 켈 수 있으나 접선방향의 이동은 재기 어렵다. 이와 같이 반점사진계측법과 홀로그래피 간섭계측법의 이동벡터에 대한 측정감도가 서로 보완적이므로 이 두 측정법을 동시에 적용할 수 있다면 물체표면의 삼차원 이동벡터를 완전히 켈 수 있다. 이러한 일을 실현시키는 방법으로 상평면 홀로그래를 이용하는 방법이 제시되고 실험적으로 입증되었다.^[16,17] 이 방법은 반점사진계측법과 홀로그래피 간섭계측법의 장점을 모은 것으로 앞으로 정량적인 변형분석에 많이 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 레이저 반점 전단 간섭계측법 (Laser speckle shearography)^[5,6]

많은 경우 실제로 재려는 것은 물체표면의 이동벡터가 아니라 변형율이다. 반점사진계측법을 써서 변형율을 결정하려면 물체표면의 각 점에서의 이동벡터를 재고, 가까이 있는 두 점에서의 이동벡터의 차이를 두 점사이의 거리로 나누어 주어야한다. 이 과정은 수치미분에서 흔히 보는 것으로 이동벡터를 켈 때 들어간 오차가 증폭되어 변형율 값에서는 오차가 커진다. 그러므로 변형율과 직접 관련된 양을 반점사진에 기록하는 것이 더 바람직하다. 이것이 반점 전단간섭계측법의 기본 착상이다. 이 방법에서는 그림 3과 같이 결상렌즈 앞에 구멍이 두개 뚫린 판을 두고 하나의 구멍 앞에 얇은 프리즘을 두어 물체의 반점상이 똑같은 것 두개가 생기되 위치가 조금 어긋난 채 겹쳐진 전단간섭상이 만들어지도록 한다.

이 전단간섭상의 각 점들은 물체표면의 두 점 $P(x)$ 와 $P(x+\delta x)$ 에 대응되므로 각 반점에는 물체표면의 두 점으로부터 나온 빛이 서로 간섭하여 속에 미세한 격자 모양의 간섭무늬가 만들어지며, 이 무늬의 평균간격은 두 구멍사이의 거리와 결상렌즈의 초점거리의 비에 따라 결정된다. 물체표면이 변형되면 상평면의 반점 하나에

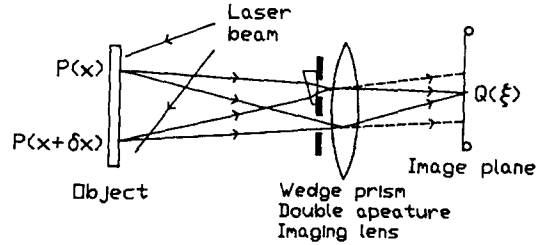


그림 3. 레이저 반점 전단간섭상 기록장치.

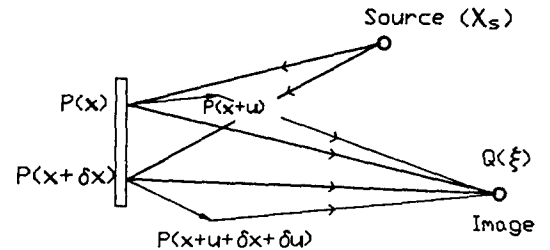


그림 4. 레이저 반점 전단간섭 계측법에서의 광경로.

대응되는 물체표면의 두 점에서 나오는 빛의 위상차가 달라지므로 반점들 속에 만들어지는 간섭무늬의 위상도 달라진다. 이 위상변화가 π 의 홀수배가 되면 반점 속에 만들어지는 간섭무늬의 밝고 어두운 부분이 완전히 뒤바뀐다. 따라서 물체가 변형되기 전과 변형된 다음의 두 반점상을 사진필름 한 장에 겹쳐 기록하면 물체표면의 변형 때문에 위상이 π 의 홀수배 만큼 달라진 곳의 반점 속에서는 미세한 간섭무늬가 지워지고 π 의 짝수배 만큼 달라진 곳의 반점 속에서는 미세한 간섭무늬가 고스란히 남아있게 된다. 반점의 전단간섭상이 기록된 사진필름에 레이저 광을 비추면 반점들이 빛을 회절시켜 회절광륜을 만드는데, 속에 미세한 격자모양의 간섭무늬가 잘 보존된 반점들은 빛을 더 큰 각도로 회절시켜 광축을 중심으로 대칭을 이루는 세개의 회절광륜을 만들어내고, 미세한 격자모양의 간섭무늬가 지워진 반점들은 광축을 중심으로 단 하나의 회절광륜을 만들어낸다. 그림 3과 같은 장치를 써서 세 회절광륜 가운데 바깥쪽으로 회절된 어느 하나만을 골라 렌즈를 써서 반점상을 재구성하면 물체의 반점상이 다시 나타나는데, 그 쪽으로 빛을 회절시키지 못한 반점들은 재생되지 못하여 어두운 줄무늬를 이룬다. 따라서 물체가 변형되기 전, 후의 반점전단상을 겹칠 때 반점속에 미세한 간섭무늬가 남아 있느냐 또는 지워지느냐, 다시 말해 물체의 변형때문에 생겨난 위상변화가 π 의 홀수배가 되느냐 짝수배가 되느냐가 재생상의 밝기변화로 나타난다. 이 위상변화는 그림 4와 같은 광학

계에서는 다음과 같이 정해진다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x-x_s}{|x-x_s|} + \frac{\xi-x}{|\xi-x|} \right) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \cdot \Delta x \quad (3)$$

여기에서 x_s 는 광원의 위치, Δx 는 비껴 겹쳐지는 두 점 사이의 거리벡터, 그리고 u 는 물체표면의 점 x 의 이동벡터이다. 이 식으로부터 알 수 있는 바와 같이 광원의 위치 x_s 와 결상렌즈 앞에 두는 두 구멍의 위치에 따라서 측정되는 변형율이 달라진다. 레이저 전단간섭계측법은 이미 비행기용 타이어에 대한 표준적인 결함검사과정이 되어 있으며 국내 타이어 업계에서도 공정관리에 쓰고 있다. 그림 5는 레이저 전단간섭계측법을 써서 얻은 승용차 타이어의 안쪽 표면에서의 변형율 분포를 보여주는 사진이다.



그림 5. 레이저 전단간섭계측법을 써서 찾아낸 승용차 타이어 내부의 결함.

3. 두 반점 사진판 비교계측법 (Dual plate speckle photography)^[7-9]

물체가 변형되기 전과 변형된 다음의 두 반점상을 한장의 사진필름에 겹쳐 기록하지 않고 다른 사진필름 (실제로는 사진유리판을 쓰는 것이 더 편리하다)에 따로 기록할 수도 있다. 이 방법은 번거롭기는 하지만 물체의 변형이 상당히 커서 이중노출 반점사진계측법으로는 선명한 간섭무늬가 얻어지지 않을 경우에는 변형이 일어나는 과정을 여러 단계로 나누어 각 단계마다의 반점상을 기록하여 차례로 비교하면 변형이 진행되는 과정을 자세히 알 수 있고 그 변형량을 모두 누적시켜 총변형량도 알 수 있다. 반점사진판을 읽어내는 방법은 비교하려는 두 반점상이 기록된 사진필름 두 장을 마주 붙여 겹치게 하면 점판독을 하든 전면판독을 하든 이중노출 반점 사진계측법과 크게 다를 것이 없다. 두 장의 사진필름을 겹칠 때 상대적인 위치를 조절하면 간섭무늬를 가장 쉽게 읽을 수 있게 한 다음에 반점상 전체를 읽어낼 수 있는 유통성이 있다. 보기를 들면 물체의 변형에 덧붙여 전체적인 이동(병진운동)이 있을 경우에 두 반점상의 상대적인 위치를 조정함으로써 그 병진운동에 해당하는 이동벡터를 미리 제거할 수도 있고, 물체표면의 각 부분의 이동방향이 반대인 부분들이 있을 경우에 두 반점상의 상대적인 위치를 조정함으로써 어느 한방향의 이동벡터의 크기를 늘려주면 반대방향의 이동벡터의 크기는 줄어들기 때문에 이동 방향을 쉽게 구별할 수 있다. 반점상이 두 장의 사진필름에 따로 기록되어 있는 점을 이용하면 헤테로다인 기법을 써서 반점들의 이동벡터를 아주 정밀하게 잴 수 있는데, 이것은 이중노출 반점사진법에서는 실현할 수 없는 장점이다.^[13,14] 헤테로다인

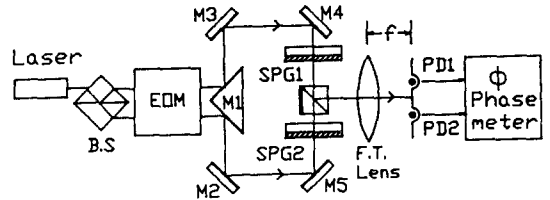


그림 6. 헤테로다인 기법을 써서 두 반점사진판을 읽어내는 장치의 기본구조.

기법은 진동수가 다른 두 빛을 섞어 광검출기로 받으면 이 때 생기는 광전류에는 두 빛의 진동수 차이만큼의 진동수를 가진 교류신호가 생기며 이 신호의 위상은 두 빛의 위상차이와 같은 점을 써서 두 빛의 위상차를 정밀하게 재는 방법이다. 전기신호의 위상을 재는데는 위상계측기(phase meter)를 쓰면 0.1도의 정확도는 쉽게 얻을 수 있는데, 이 값은 달리 오차를 일으키는 원인이 없다면 0.03%의 상대오차로 반점들의 이동벡터의 크기를 잴 수 있음을 뜻한다. 이 방법은 간섭무늬의 밝기변화를 이용하지 않고 위상을 직접 읽어 내므로 반점들의 이동벡터의 방향에 해당하는 위상값의 부호도 곧바로 결정할 수 있고, 이동벡터의 크기가 반점의 평균크기보다 작아 회절광률 속에 간섭무늬의 어두운 부분이 나타나지 않는 경우에도 변위를 정확히 잴 수 있다. 다만 이 방법은 반점사진 전체를 한꺼번에 판독하는데는 쓸 수 없고, 반점들이 이동하는 과정에서 그 모양과 배열이 상당히 바뀌어 반점무늬의 상관도가 나빠지면 반점사진을 판독할 때 신호에 잡음이 많이 생겨 측정된 위상값의 오차가 커지는 약점이 있다. 헤테로다인 기법을 쓰려면 간섭하는 두 빛의 진동수가 달라야 하므로 이중노출 반점 사진

계측법에서는 쓸 수 없다. 헤테로다인 기법을 써서 두 반점사진판을 비교하여 읽어내는 장치의 기본구조는 그림 6과 같다.^[11]

헤테로다인 기법을 쓰면 측정결과가 아주 정밀하게 나오므로 반점 사진계측법을 쓰면 반점들의 이동거리를 얼마까지나 정확하게 잴 수 있는가 하는 물음이 자연스럽게 나온다. 이에 관한 이론적인 분석의 결과 측정정밀도는 두가지 요소에 의해 제한된다는 것이 알려졌다. 가장 본질적으로 정밀도를 제한하는 요소는 반점 자체의 크기와 측정에 쓰이는 반점의 수로서, 측정오차의 크기는 반점의 평균 크기에 비례하고 측정에 쓰이는 반점들의 수의 제곱근에 반비례한다. 상대오차가 측정에 쓰인 반점들의 수의 제곱근에 반비례하는 것은 각 반점들의 특성이 통계적으로 완전히 독립이기 때문이고, 반점의 평균 크기에 비례하는 것은 반점의 크기가 유한한 것을 반영하는 것이므로 반점 계측법에서의 양자잡음의 한계라고 볼 수 있다. 따라서 이러한 오차의 원인을 반점잡음(speckle grain noise)라고 부른다. 여기에 더하여 물체의 표면이 변형됨에 따라서 반점들의 모양이 달라지기 때문에 생기는 오차가 있는데, 이것은 헤테로다인 기법을 쓸 때 반짝거리는 반점들로 나타나므로 명멸잡음(scintillation noise)라고 부른다. 이 반점잡음과 명멸잡음의 두가지가 헤테로다인 기법을 써서 반점들의 이동거리를 잴 때 측정결과와 정확도를 궁극적으로 제한한다.^[10,11]

헤테로다인 기법은 위상을 analogue 방식으로 재는 것이므로 이에 대응하여 위상을 digital 방식으로 재는 방법을 당연히 생각할 수 있다. 간섭하는 두 빛의 위상차를 조절할 수 있다면 다음과 같은 방법으로 위상을 직접 잴 수 있다.

$$\phi = \arctan \left\{ \frac{I(0) - I(\pi)}{I(\pi/2) - I(3\pi/2)} \right\} \quad (4)$$

여기에서 $I(0)$ 은 아무런 위상값을 더해지지 않았을 때의 간섭무늬의 밝기분포이고, $I(\pi/2)$, $I(\pi)$, $I(3\pi/2)$ 는 각각 위상값을 $\pi/2$, π , $3\pi/2$, 만큼 더해줄 때의 간섭무늬의 밝기분포들이다. 물론 위상값을 덧붙여 주려면 간섭하는 두 빛 가운데 어느 하나에만 위상을 더해줘야 하므로 이중노출 반점 사진계측법에서는 쓸 수 없고 두 반점사진판 비교계측법에서만 이 방법을 쓸 수 있다. 그림 7은 위상이동기법을 써서 두 반점사진판을 읽어내는 장치의 개념적인 그림인데, 최근에 이러한 착상의 실현가능성을 보여준 실험결과가 보고 되었다.^[12,18]

이 장치에서 위상값을 변화시키는데는 PZT를 붙여둔 거울을 쓰고, 위상값을 변화시킬 때마다 갠 반점상의

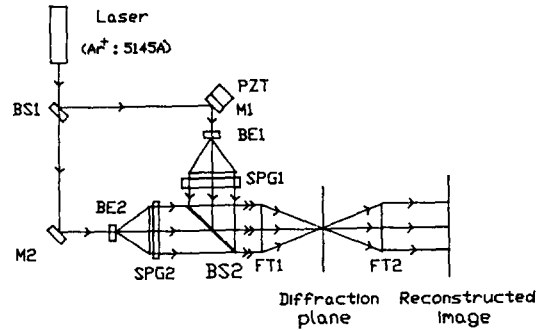


그림 7. 위상이동기법을 써서 두 반점사진판을 읽어내는 장치의 기본구조.

밝기분포는 CCD나 이차원 배열 광다이오우드를 써서 재며, 필요한 수치계산을 소형 컴퓨터를 써서 하면 된다. 이 방식은 반점사진 전체의 변위분포를 한꺼번에 잴 수 있어서 좋은데, 측정 정밀도는 헤테로다인 기법보다는 떨어지지만 그 밖의 다른 방법보다는 좋을 것으로 예상된다. 특히 헤테로다인 기법을 쓰는 경우와는 달리 반점사진을 판독할 때 레이저 광속을 반점사진의 이곳저곳으로 옮겨가며 읽어내지 않아도 되므로 판독장치를 설계하고 만들 때의 어려움이 덜어지고 사용조건이 덜 까다로운 장점이 있다.

III, 반점사진법을 이용한 유속측정법 (Particle image velocimetry)^[19,20]

투명한 유체가 흐르는 속도를 재는 일은 기술적으로 어려워면서도 공학적으로 중요하다. 유속을 재는 방법들 가운데 대표적인 방법이 도플러 효과를 이용하는 광량자 상관법(photon correlation method)이다. 이 방법을 써서 잴 수 있는 유속의 범위가 대단히 넓고 또 정확하게 잴 수 있기 때문에 공학적인 실험에서는 많이 쓰인다. 다만 실험장치가 비싸서 쉽게 쓸 수 있는 방법은 아니고, 또 한 번의 측정에서 단 한 곳의 유속을 잴 수 있을 뿐이므로 유속분포를 알고자 하는 경우에는 노력과 시간이 많이 든다. 레이저 반점 또는 백색광 반점 사진계측법을 쓰면 장치구성이 단순하고 전체적인 유속분포를 비교적 간단하게 알 수 있다. 투명한 유체에서는 산란되는 빛의 양이 아주 작아서 유체로부터 산란되는 빛만을 그대로 사진필름에 기록하여 반점상을 만들수는 없으므로 빛을 많이 산란시키는 미립자들을 유체에 섞어 넣어 준다. 미립자의 크기는 유체의 고유한 흐름에 영향을 주지 않을 만큼 작으면서도 산란시키는 빛이 충분히 밝아서 사진필름에

날날의 미립자가 잘 기록될 수 있을 만큼 커야하며, 수효는 사진필름에 기록되는 반점의 수효가 충분히 많아서 판독과정이 어렵지 않도록 실험에 앞서서 적당히 추산하여 결정한다. 흔히 쓰이는 미립자는 스티렌 중합체로 만든 지름이 수십-수백 마이크로인 작은 공들이나 산화 알루미늄 또는 금속 알루미늄가루이다. 여기에 레이저나 섬광 등을 광원으로 써서 빛을 비추어주면 유체에서는 빛의 거의 산란되지 않지만 미립자에서는 많이 산란되므로 마치 밝은 반점들이 유체의 흐름을 따라가는 것처럼 보인다. 유속을 측정하려면 이 반점상을 이중노출법을 써서 사진필름에 기록하는데, 겹쳐 기록되는 두 반점상의 상관도를 적당한 수준으로 유지하려면 유체가 흐르는 속도에 따라 두 반점상을 기록하는 시간간격을 잘 조절해야 한다. 상관도가 좋은 두 반점상이 겹쳐 기록된 사진필름이 얻어지면 이것으로부터 반점들의 이동벡터를 읽어내는 일은 이중노출 반점사진계측법에서 쓴 방법을 그대로 쓸 수 있다. 특히 전면판독법을 쓰면 유체의 흐름을 보여주는 무늬(flow pattern)을 얻을 수 있다. 유속을 정량적으로 재는 것 보다는 유체가 흐르는 모양과 대략적인 유속의 분포만을 알고자 할 경우에는 이중노출 보다는 일정시간 동안 계속 반점상을 사진필름에 기록한다. 그러면 반점들의 궤적이 기록되는데, 이것을 확대하여 보거나 아니면 공간주파수 여과법을 쓰면 유동의 모양을 볼 수 있다. 이러한 실험을 할 때는 유체에 섞어 넣는 미립자의 농도를 줄여야 한다. 최근에는 소형 컴퓨터에 접속된 CCD 사진기를 써서 반점상을 여러개 기록하고 이들을 컴퓨터로 화상처리하여 유선을 파악하기도 한다.

IV. 맺는말

레이저 반점 사진계측법은 물체표면의 미소한 움직임이나 변형, 진동을 재는 방법으로 실험기법과 장치가 단순하면서도 측정결과가 상당히 정밀하다. 여기에 헤테로다인 기법이나 위상이동기법을 덧붙이면 측정정밀도를 훨씬 더 높일 수 있다. 이 방법은 빛을 이용하므로 대상물체와 접촉하지 않고서도 변형을 잴 수 있어서 온도, 압력, 주변의 조광상태 등 여러가지 작업조건이 험한 곳에서도, 그리고 멀리 떨어져 있는 등의 이유로 물리적인 접근이 어려운 물체에 대해서에서도 쓸 수 있다. 반점상을 기록하는데 쓰이는 광학계는 사용조건에 맞게 측정감도, 측정량 등을 바꾸어 줄 수 있다. 소형 컴퓨터들이 성능은 좋아지면서도 값은 싸지고 있으므로 이를 반점사진의 판독과정에서 잘 쓰면 측정을 더욱

효율적이고 정밀하게 할 수 있다. 레이저 반점무늬는 지금까지 설명한 물체표면의 변형과 이동 그리고 유속의 측정뿐만이 아니라 물체표면의 거칠기(粗度 : roughness)에 따라서 반점무늬의 콘트라스트가 달라지는 것을 이용한 표면 거칠기 측정^[2,3]과 대기의 요동에도 불구하고 천체 망원경에서 회절한계의 분해능을 실현시키는 별빛 반점무늬 간섭계측법(stellar speckle interferometry)과 같은 영상처리에도 응용되고 있다.^[21,22]

V. 감사의 글

이 논문의 그림 5에 실린 타이어 내벽의 변형율 분포를 보여주는 레이저 반점 전단간섭상의 사진을 보내주시신 (주)금호 타이어 연구소의 관계자 여러분께 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

- [1] 김진승, 한국광학회지 4, 496(1993).
- [2] 이상수, 레이저 스펙클과 홀로그래피, 교학연구사 (1988).
- [3] J. C. Dainty, ed., *Laser Speckle and Related Phenomena* (Springer Verlag, Berlin, 1984).
- [4] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, second edition (Cambridge University Press, London, 1989).
- [5] Y. Y. Hung, *Opt. Eng.* 21, 385(1982).
- [6] 박병구, 레이저 스펙클 전단간섭계를 이용한 표면 변형율 측정, 석사학위 논문, 전북대학교 (1986); 박병구, 김진승, *응용물리* 1, 230(1988).
- [7] F. D. Adams and G. E. Maddux, *AFFDL-TM-75-57-FBR* (U.S.A.F. Flight Dynamics Lab., Wright-Patterson A.F.B., Ohio, 1975).
- [8] G. B. Smith and K. A. Stetson, *Appl. Opt.* 19, 3031(1980).
- [9] J. S. Kim, M. Giglio, U. Perini, and S. Musazzi, *Appl. Opt.* 28, 1862 (1989).
- [10] K. A. Stetson, *Appl. Opt.* 23, 920(1984).
- [11] J. S. Kim, M. Giglio, U. Perini, and S. Musazzi, *Appl. Opt.* 26, 4653(1987); J. S. Kim, *J. Opt. Soc. Am.* A6, 675-681(1989).
- [12] 장덕규, 김진승, *응용물리* 3, 12(1990).
- [13] B. Ineichen, P. Elgin, and R. Daendliker, *Appl. Opt.* 19, 2191(1980).
- [14] G. T. Reid, *Optics and Lasers in Engineering* 7, 37(1986/7).
- [15] J. M. Huntley, *Appl. Opt.* 31, 4834(1992); *Appl.*

- Opt. **28**, 4316(1989); J. Phys. E **19**, 43(1986); Appl. Opt. **25**, 382(1986).
- [16] S. Toyooka and H. Nishida, Appl. Opt. **27**, 3958 (1988).
- [17] 박승욱, 권영하, 유성규, 한국광학회지 **1**, 12(1990); 박승욱, 한국기계학회논문집 **17**, 1208(1993).
- [18] G. H. Kaufmann and P. Jacquot, Appl. Opt. **31**, 3201(1992).
- [19] R. Meynart, Appl. Opt. **22**, 535(1983).
- [20] 이교태, 응용물리 **5**, 242(1992).
- [21] A. Labeyre, "High Resolution Technique in Optical Astronomy," in Progress in Optics, E. Wolf, ed., (North-Holland, Amsterdam, 1977), Vol XIV.
- [22] 조두진, 한국광학회지 **4**, 28(1993).

Principles and Applications of Laser Speckle Metrology : II. Laser Speckle Photography

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 photography and its applications to the measurement of surface displacement and deformation and to flow velocimetry.