

레이저 반점사진 계측법: 원리와 이를 응용한 물체의 이동 및 표면변형 측정

(Laser Speckle Photography : Principle and its Applications to the Measurement of Surface Displacement and Deformation)

김진승

전북대학교 자연과학대학 물리학과

초록 : 레이저 반점사진 계측법의 원리와 이를 응용하여 물체표면의 움직임이나 변형을
재는 여러가지 방법에 관하여 설명하였다.

1. 서론

반점무늬(speckle pattern)란 작고 모양이 불규칙한 점들이 제멋대로 흩어져 있는 것을 일컫는다. 레이저 반점무늬(laser speckle pattern)는 광학적으로 거친 표면에 레이저광을 비추어 줄 때 나타나는 반점무늬인데, 물체 표면에서 산란되어 퍼져나간 빛이 만드는 반점무늬를 회절 반점무늬(objective speckle pattern)라하고 물체 표면에서 산란된 빛을 렌즈등으로 모아 물체의 상을 만들 때 나타나는 반점무늬를 결상반점무늬(subjective speckle pattern)라 한다. 물체표면을 하얗게 칠하고 그바탕위에 다른 색깔(흔히 검은색)의 도료를 흩어 뿌려서도 반점무늬를 만들 수 있는데 이것을 백색광 반점무늬(white light speckle pattern)라 한다. 이 글에서는 레이저 결상반점무늬와 이를 이용한 레이저 반점사진 계측법에 관해 설명한다.

반점무늬의 특성은 반점들의 통계적 성질에 따라 정해지는데 흔히 반점무늬의 contrast 다시 말해 반점들의 밝기가 평균값을 중심으로 얼마나 넓은 범위에 걸쳐서 퍼져 있는가, 그리고 반점들이 평균적으로 어떤 모양이고 그 크기가 얼마인가로 나타낸다.[1] 이러한 변수들은 반점들의 밝기에 대한 확률분포함수로 부터 계산할 수 있는데

표면이 충분히 거친 물체로부터 산란된 레이저광을 렌즈로 모아 상을 만들 때 생기는 결상 반점무늬에서는 밝기의 확률분포함수가 역지수함수이다. 따라서 이 반점무늬의 contrast 값은 1 이되어 밝고 어두운 부분이 뚜렷이 대비되어 나타난다. 반점의 평균적인 크기는 위치에 대한 반점의 밝기의 상관함수를 구하면 알 수 있는데 레이저 결상 반점에서는 다음과 같이 정해진다.

$$\sigma = \frac{\lambda \cdot f}{(1-M)} \quad (1)$$

여기서 λ 는 레이저빛의 파장, f 는 결상광학계의 수치구경, M 은 상의 배율이다. 광학계의 구경을 조절하면 반점의 평균크기를 조절할 수 있음을 이 공식으로부터 알 수 있다.

물체가 움직이거나 변형되면 반점무늬도 물체표면의 움직임을 따라 이동하며 아울러 반점들의 모양도 달라진다. 반점무늬가 형성된 상태에서 물체가 시선방향에 대해 수직하게 아주 조금 움직이거나 변형되면 반점들은 모양이 거의 변하지 않은 채 물체표면의 움직임을 따라 이동한다. 그러므로 반점들의 이동방향과 이동거리를 재면 물체표면이 시선방향에 대해 수직방향으로 얼마나 이동하거나 변형되었

는가를 알 수 있다. 물체가 시선방향으로 움직일 때는 물체표면으로부터 결상광학계까지의 거리가 변하므로 상평면에서의 반점들의 크기와 위상이 변한다. 따라서 반점들의 크기나 위상변화를 재면 물체표면의 시선방향의 움직임을 잴 수 있다.[2-4] 물론 물체의 이동이나 변형이 너무 크면 반점무늬의 모양이 많이 바뀌어 반점들이 어디에서 어디로 이동했는지를 알 수 없게 되므로 이 방법으로 잴 수 있는 물체표면의 이동과 변형량의 크기에는 한계가 있다.[5,6]

레이저 반점을 써서 물체표면의 움직임을 잴 때 반점들이 움직인 거리가 반점의 평균 크기보다 큰가 작은가에 따라 반점의 이동거리를 재는 방법이 다르다. 반점이 움직인 거리가 반점의 평균 크기보다 작을 경우에는 레이저반점 간섭계측법(Laser speckle interferometry)을 쓰고, 반점의 평균 크기보다 클 경우에는 반점사진 계측법(Speckle photography)을 쓴다. 레이저반점 간섭계측법과 반점사진 계측법은 홀로그래피 간섭계측법과 함께 물체표면의 미소한 변형을 재는데, 표면의 진동모우드를 재는데, 그리고 유체의 흐름에서 유속분포를 재는데 쓰인다.[2,3]

2. 레이저 반점사진 계측법의 원리

레이저 반점사진 계측법은 움직임이나 변형을 재어 야할 물체의 반점상(speckled image)을 사진필름에 기록하는 과정과 이 사진필름에 기록된 반점들의 이동을 읽어내는 과정 이렇게 두 단계의 과정을 거쳐 이루어진다. 반점상을 사진필름에 기록하는 방법에는 물체가 변형되기 전과 변형된 뒤의 반점상을 한 장의 사진필름에 겹쳐 기록하는 이중노출 반점사진 계측법(Double exposure speckle photography), 물체의 반점상을 똑 같은 것 두개 만들어, 그 두개의 상을 조금 어긋난 채 겹쳐지게한 진단간섭상을 사진필름에 기록하는 반점 전단간섭계측법(Speckle Shearing Interferometry 또는 speckle shearography), 그리고 물체가 변형되기 전과 변형된 뒤의 반점상 각각을 따

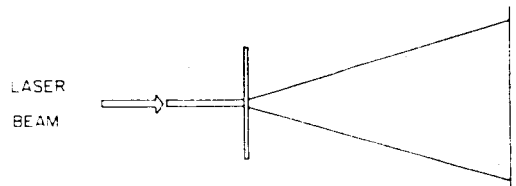
로따로 사진필름 한 장씩에 기록한 다음 두 반점사진판을 겹쳐 비교하여 반점들의 이동을 재는 두 반점사진판 비교 계측법(Dual plate speckle photography)의 세가지가 있다. 반점사진을 판독하는 방법에는 반점상의 어느 한 곳에 가느다란 레이저 빛다발을 비추어 그곳에서의 반점들의 이동을 재는 점판독(pointwise reading)법과 공간주파수 여과법을 써서 반점상 전체에서의 반점들의 이동벡터의 분포를 읽어내는 전면판독(whole field reading)법이 있으며, 간섭계측법에서 쓰는 헤테로다인기법과 위상이동기법을 함께 쓰면 이 방법들의 정밀도를 높일 수 있다

2.1 이중노출 반점사진 계측법

이 방법에서는 물체가 변형되기 전과 변형된 뒤의 반점상을 한 장의 사진필름에 겹쳐 기록하므로 방법이 가장 간단하고 따라서 가장 널리 쓰인다.

물체표면의 어느 한 점의 이동벡터를 알고자 하면 반점상을 겹쳐 기록한 사진필름에서 그 점에 대응되는 곳에 가느다란 레이저 빛다발을 사진필름에 수직하게 비추어 준다(그림 1).

그림 1. 이중으로 기록한 반점사진을 점판독하는 장치.



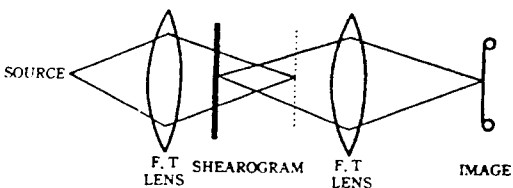
레이저 빛다발은 사진필름에 기록된 반점무늬 때문에 회절되어 동그란 회절광륜을 만드는데, 레이저 빛다발이 비추어진 부분에 들어 있는 여러 반점들 가운데 모양이 똑 같고 위치만 다른, 짝을 이루는 반점들이 회절시킨 빛들은 서로 간섭하여 다음과 같이 영의 간섭무늬를 회절광륜 속에 만든다.

$$I(x, y) = I_0(x, y) \left\{ 1 + \cos \left[2\pi \left(\frac{dx \cdot x + dy \cdot y}{\lambda \cdot f} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

여기서 $I(x,y)$ 는 반점상 하나가 만드는 회절광륜의 밝기 분포, $\vec{d} = (dx,dy)$ 는 반점쌍들의 이동벡터이다. 이 간섭 무늬의 방향은 반점쌍들의 이동방향과 같고, 간섭무늬의 간격은 반점쌍들의 이동거리에 반비례한다. 그러므로 회절광륜 속에 나타나는 영의 간섭무늬의 방향과 간격으로부터 반점들의 이동벡터를 알 수 있고, 이로부터 다시 물체표면의 한 점에서의 이동벡터를 알 수 있다. 이 방법은 간단하고 비교적 정밀하다. 그러나 물체표면의 여러 곳에서의 이동 벡터를 알고자 할 때는 레이저 빔다발을 비추어주는 곳을 이리저리 바꾸어주면서 똑 같은 일을 여러번 되풀이해야 하므로 지루하고도 긴 시간이 걸린다. 따라서 소형 전산기를 써서 점판독과정을 자동화 하기도 한다. 영의 간섭무늬의 방향과 간격을 잴 때는 흔히 간섭무늬의 차수가 정수 또는 반정수가 되는 곳 다시 말하면 무늬가 가장 밝은 곳과 가장 어두운 곳들을 찾아 내는데 이 때 오차가 많이 들어가며 간섭무늬가 흐릴 때는 특히 오차가 더 커진다. 이차원배열 광다이오드(Two dimensional photodiode array) 또는 전하결합소자(Charge Coupled Device)를 써서 간섭 무늬가 만들어진 회절광륜의 밝기분포를 재고 이것을 소형 전산기를 써서 이차원 푸리에 변환하여 공간주파수 스펙트럼이 가장 큰 값을 가지는 성분을 찾아 내면 간섭무늬가 흐려 눈으로는 잘 안보일때도 간섭무늬의 방향과 간격을 상당히 정확하게 잴 수 있다.[7-9]

물체표면 전체에 걸친 이동이나 변형의 분포를 빨리 살피는데는 점 판독법은 시간이 많이 걸리므로 적당하지 않다. 이 때는 그림 2와 같이 장치를 꾸미면 렌즈 L1은 반점상이 회절시킨 빛을 푸리에 변환시켜 그 뒤초평면에 사진필름에 겹쳐 기록된 두 반점상의 공간주파수 스펙트럼이 형성되어 겹쳐지고, 렌즈 L2는 이 스펙트럼을 푸리에 역변환하여 그 뒤 초평면에 반점상을 재생시킨다.

그림 2. 이중으로 기록한 반점사진을 전면 판독하는 장치.



모양이 같고 위치가 다른 두 반점무늬의 공간주파수 스펙트럼은 진폭은 같으나 위상이 다르므로 두 스펙트럼이 겹쳐지는 스펙트럼평면에는 점판독법에서 본 것과 같은 영의 간섭무늬가 나타나는데 모든 반점쌍들이 만드는 간섭무늬들이 겹쳐진다. 이제 이 평면에 작은 구멍이 나있는 판을 두면 그 구멍이 나있는 곳에 영의 간섭무늬의 밝은 부분을 만드는 반점쌍이 회절시킨 빛은 구멍을 빠져나가고 영의 간섭무늬의 어두운 부분을 만드는 반점쌍이 회절시킨 빛은 구멍을 빠져나가지 못한다. 스펙트럼 평면에 방향과 간격이 똑 같은 영의 간섭무늬를 만드는 반점들로부터 회절된 빛은 구멍을 통해 빠져나가는 양이 같으므로 이 빛을 역푸리에 변환하여 재생시킨 반점상에는 밝기가 같은 줄무늬들을 만든다. 따라서 재생된 반점상에서 밝기가 같은 하나의 줄무늬 위에 있는 반점들은 이동벡터의 방향과 크기가 똑 같고, 서로 이웃한 두 줄무늬 위에 있는 반점들의 이동벡터의 차이 δd 는, 스펙트럼 평면에 있는 여과구멍의 위치를 D 라하면,

$$\delta d = \frac{\lambda \cdot f}{D} \quad (3)$$

이다. 재생상에 생겨난 줄무늬의 간격이 조밀한 부분은 변형율이 큰 곳이므로 전면판독법을 쓰면 변형이 집중되는 곳을 쉽게 찾아낼 수 있다.

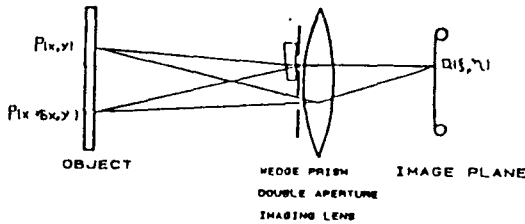
2.2 반점 전단간섭계측법(Speckle Shearing

Interferometry)

많은 경우 실제로 알고자 하는 양은 표면의 이동벡터가 아니라 변형율인데, 반점사진계측법을 써서 이 양을 알아내 고자 하면 표면의 각 점에서의 이동벡터를 재고, 가까이 있는 두 점에서의 이동벡터의 차이를 두 점사이의 거리로 나누어 주어야한다. 이과정은 수치미분에서 흔히 보는 것으로 이동벡터를 잴 때 들어간 오차때문에 나중에 얻어지는 변형률 값에 큰 오차가 생긴다. 그러므로 좀더 바람직한 것은 변형률에 직접 관련된 양이 반점사진에 기록되도록 하는 것이고 이것이 반점 전단간섭계측법의 기본 착상이다.[10-12] 이 방법에서는 그림 3과 같이 결상렌즈 앞

에 구멍이 두개 뚫린 판을 두고 하나의 구멍 앞에 얇은 프리즘을 두어 물체의 반점상이 똑 같은 것 두개가 생기되, 그 두개의 상이 조금 어긋난 채 겹쳐진 전단간섭상이 만들어지도록 하여 물체가 변형되기 전과 변형된 뒤의 상을 사진필름 한장에 겹쳐 기록한다.

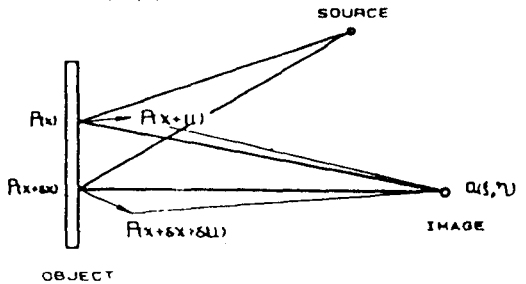
그림 3. 레이저 반점 전단간섭상의 기록장치 개략도. 결상 렌즈 앞에 둔 쉐기꼴 프리즘과 이중동공 때문에 물체표면 위의 두 점 $P(x,y)$ 와 $P(x+\delta x,y)$ 의 상이 상평면위의 한 점 $Q(\xi,\eta)$ 에 겹쳐진다.



이렇게 기록된 상을 이루는 각 반점들은 물체표면의 두점 $P(x,y)$ 와 $P(x+\delta x,y)$ 에 대응된다. 각 반점은 물체 표면의 두 점으로부터 나온 빛이 서로 간섭하여 속에 미세한 간섭 무늬가 만들어지며 이 간섭무늬의 평균간격은 두 구멍 사이의 거리와 결상렌즈의 초점거리의 비에 따라 정해진다. 물체표면이 변형되면 하나의 반점에서 겹쳐지는 두 점에서 나오는 빛의 위상차도 달라지므로 반점들 속에 만들어지는 간섭무늬의 위상도 달라지는데, 그 위상변화가 180도가 되면 반점 속에 만들어지는 간섭무늬의 밝고 어두운 부분이 앞에서는 완전히 뒤바뀐다. 따라서 두 반점상을 사진필름 한장에 겹쳐 기록하면 위상변화가 180도의 홀수배만큼 된 부분의 반점 속에는 미세한 간섭무늬가 지워지고 180도의 짝수배만큼 된 부분의 반점 속에는 미세한 간섭무늬가 고스란히 남아 있게 되는데 반점 속의 미세한 간섭무늬의 선명함이 물체표면의 변형에 의해 생긴 위상변화에 따라 달라진다. 반점의 전단간섭상이 기록된 사진필름에 레이저광을 비추면 반점들이 빛을 회절시켜 회절광륜을 만드는데, 속에 미세한 간섭무늬가 형성된 반점들은 빛을 더 큰 각도로 회절시켜 광축을 중심으로 대칭을 이루는 세개의 회절광륜을

만들어 내고 그 미세한 간섭무늬가 지워진 반점들은 광축을 중심으로 단 하나의 회절광륜을 만들어낸다. 그림 2와 같은 장치를 써서 세 회절광륜 가운데 바깥쪽으로 회절된 어느 하나만을 골라 렌즈를 써서 상을 재구성하면 물체의 반점상이 다시 나타나는데, 그쪽으로 빛을 회절시키지 못한 반점들은 재생되지 못하여 어두운 줄무늬를 이룬다. 따라서 물체가 변형되기 전,후의 두 반점전단상을 겹칠 때 반점 속에 미세한 간섭무늬가 남아 있느냐 또는 지워지느냐, 다시 말하면 물체의 변형때문에 생겨난 위상변화가 180도의 홀수배가 되느냐 짝수배가 되느냐 재생상에서의 밝기 변화로 나타난다. 이 위상변화는 그림 4와 같은 광학계에서는 다음과 같이 정해진다.

그림 4. 레이저 반점 전단간섭상을 기록할 때의 광경로의 개략도



$$\delta = (K_s + K_l) \cdot u$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \frac{x + x_s}{R_s} + \frac{\xi - x}{R_0} \right\} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \cdot \delta x$$

$$= A \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \cdot \delta x,$$

$$= \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{ij} = \frac{\partial u}{\partial x_j} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (4)$$

그림 5는 이러한 방법으로 얻은 자동차 타이어의 안쪽 표면에서의 변형율분포를 보여주는 사진이다.

그림 5. 자동차 타이어의 내부 결함을 찾기위해 레이저 반점 전단 간섭계측법을 써서 얻은, 안쪽 표면의 변형을 분포를 보여주는 사진



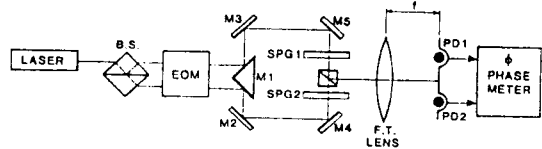
2.3 두 반점사진판 비교 계측법

이 기록법에서는 물체가 변형되기 전과 변형된 뒤의 반점상을 각각 사진필름 한장씩에 따로 기록한다. 이 방법은 반점상을 여러장의 사진필름에 따로따로 기록해야 하므로 이중노출 반점사진 계측법보다는 번거롭지만 물체의 변형이 여러 단계에 걸쳐 일어나고, 이것을 각단계마다 세밀하게 조사해야 할 때나, 물체의 변형을 아주 정밀하게 재어야 할 때는 이 방법을 쓰는 것이 좋다. 반점사진판을 읽어내는 방법은 비교하고자 하는 두 반점상이 기록된 사진필름 두 장을 마주 붙여 겹치게 하면 점판독을 하든 전면판독을 하든 이중노출 반점사진 간섭계측법과 크게 다를 것이 없다. 다만 두 장의 사진필름을 겹칠 때 상대적인 위치를 조절하여 간섭무늬를 가장 쉽게 읽을 수 있게한 뒤에 반점상 전체를 읽어내는 용통성이 더 있다.

반점상이 두 장의 필름에 따로 기록되어 있는 점을 이용하여 점판독법에서 헤테로다인기법을 쓰면 반점의 이동벡터를 최대로 정밀하게 잴 수 있다.[13,14] 헤테로다인 기법은 진동수가 다른 두 빛을 섞어 광검출기로 받으면 이때 생기는 광전류에는 두 빛의 진동수의 차이 만큼의 진동수를 가진 교류신호가 생기며 이 신호의 위상은 두 빛의 위상차와 같은 점을 써서 두 빛의 위상차를 재는 방법이다. 전기신호의 위상은 phase meter를 쓰면 0.01도까지 정확하게 잴 수 있는데 이값은 달리 오차를 일으키는 원인이 없다면 0.003%의 상대오차로 반점들의 이동벡터를 잴 수 있음을 뜻한다. 이 방법은 간섭무늬의 위상을 밝기의 변화를

통하지 않고 직접 읽어 내므로 변위의 방향에 해당하는 위상값의 부호도 결정할 수 있고, 변위가 반점의 평균크기보다 작아 회절광륜 속에 간섭무늬의 어두운 부분이 나타나지 않는 때도 변위를 정확히 잴 수 있다. 다만 이 방법은 반점사진 전체를 한꺼번에 판독하는데는 쓸 수 없고, 반점들이 이동하는 과정에서 그 모양과 배열이 상당히 바뀌면 반점사진을 판독할 때 신호에 잡음이 많이 생겨 측정된 위상값의 오차가 커지는 약점이 있다. 헤테로다인 기법을 쓰려면 간섭하는 두 빛의 진동수가 달라야 하므로 이중노출 반점사진 계측법에는 쓸 수 없다. 그림 6은 헤테로다인 기법을 써서 두 반점사진판을 읽어내는 장치의 기본 구조를 보여준다.

그림 6. 헤테로다인 기법을 써서 두 반점사진판을 읽어내는 장치의 기본 구조. SPG1, SPG2: 두 장의 반점사진판; EOM: 헤테로다인 진동수를 만들어내는 전기광학 변조기; f: 푸리에 변환렌즈의 초점거리; PD1, PD2: 두 개의 광다이오드;



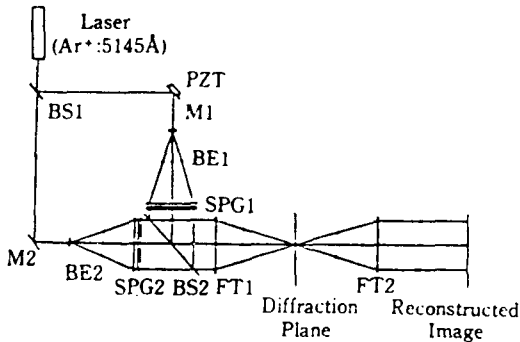
헤테로다인 기법은 위상을 analogue방식으로 재는 것으로 볼 수 있다. 따라서 위상을 digital방식으로 직접 계산할 수 있는 가능성을 당연히 생각 할 수 있는데, 그 근거가 되는 것이 식(3)이다. 우리가 간섭하는 두 빛의 위상차를 조절 할 수 있다면 다음과 같은 방법으로 위상을 직접 잴 수 있다.

$$\phi = \frac{I_0 - I_{\pi}}{I_{\pi/2} - I_{3\pi/2}} \quad (5)$$

여기서 I_0 는 아무런 위상값을 더해지지 않았을 때의 간섭무늬의 밝기 분포이고 I_{π} 는 위상값을 π 만큼 더해주

있을 때의 간섭무늬의 밝기 분포 $I_{\pi/2}$ 는 위상값을 $\pi/2$ 만큼 더해주었을 때의 간섭무늬의 밝기 분포이고 $I_{3\pi/2}$ 는 위상값을 $\frac{3\pi}{2}$ 만큼 더해주었을 때의 간섭무늬의 밝기 분포이다. 물론 위상값을 덧붙여 주려면 간섭하는 두 빛 가운데 어느 하나에만 위상을 더해주어야 하므로 이 중노출 반점사진 계측법은 쓸 수 없고, 두 반점사진판 비교 계측법을 써야한다. 그림 7은 위상이동기법을 써서 두 반점사진판을 읽어내는 장치의 개념적인 그림이다.[15]

그림 7. 위상이동기법을 써서 두 반점사진판을 읽어내는 장치의 개략도. BS1: 빛다발 분할기; M1, M2: 거울; PZT: 압전소자; BE1, BE2: 빛다발 확대기; BS2: 빛다발 결합기; FT1, FT2: 푸리에 변환 및 역변환렌즈.



위상값을 변화시키는데는 PZT를 붙여둔 거울을 쓰고, 위상값을 변화시켰을 때마다 켜 반점상의 밝기분포는 전자결합소자나 이차원배열 광다이오드를 써서 재며 필요한 수치계산은 소형 전산기를 써서 하면된다. 이 방식의 좋은 점은 반점 사진 전체의 변위분포를 한꺼번에 셀 할 수 있다는 것인데 측정정밀도는 헤테로다인기법보다는 떨어지지만 그 밖의 다른 방법보다는 좋을 것으로 예상된다. 특히 헤테로다인기법을 쓰는 경우와는 달리 반점사진을 scanning 하지 않아도 되므로 판독장치를 만들 때의 어려움이 덜어지고

사용조건이 덜 까다로와 더 널리 쓰일 수 있을 것이다.

3. 맺는말

레이저 반점 사진 계측법은 물체표면의 미소한 움직임이나 변형을 재는데 실제로 쓸 수 있는 방법이다. 이 방법은 단순하면서도 측정결과가 상당히 정밀하며, 헤테로다인 기법이나 위상이동 기법을 덧붙이면 측정 정밀도를 훨씬 더 높여 간섭계측법의 정도까지 올릴 수 있다. 또한 이 방법은 빛을 이용하므로 대상 물체에 직접 접촉하지 않고서 측정을 할 수 있어서 온도, 압력, 주변의 조명상태등 여러가지 작업조건이 험한 곳에서도 쓸 수 있다. 반점 사진을 기록하는데 쓰이는 광학계는 사용조건에 맞게 측정감도, 측정량등을 바꾸어주어 융통성을 부여할 수 있으므로 잘 궁리하면 쓰임새를 더욱 넓힐 수 있으리라 생각하며, 앞으로 성능이 더 좋아질 소형 전산기를 판독과정에서 잘 쓰면 측정을 더욱 효율적이고 정밀하게 할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 참고문헌

1. Laser Speckle and Related Phenomena, Second ed., J. C. Dainty ed., (Springer, Berlin, 1984), pp.9-45.
2. Holographic and Speckle Interferometry, R. Jones and C. Wykes, (Cambridge University Press, London, 1983).
3. 레이저 스펙클과 홀로그래피, 이 상수, 교학연구사, 서울, 1988.
4. Three Dimensional Strain Analysis by Laser Speckle Interferometry, 김 진승, 한국과학원 석사학위논문 (1980).
5. I. Yamaguchi, "Speckle displacement and decorrelation in the diffraction and image fields for

- small object deformation," *Optica Acta* 28, 1359-1376 (1981).
6. J. S. Kim, "Range and Accuracy of Displacement Measurement in Double Exposure Speckle Photography," *J. Opt. Soc. Am. A6*, 675-681 (1989).
 7. J. M. Huntley, "An Image Processing System for the Analysis of Speckle Photographs," *J. Phys. E* 19, 43-49 (1986).
 8. J. M. Huntley, "Speckle photography fringe analysis: assessment of current algorithms," *Appl. Opt.* 28, 4316-4322 (1989).
 9. J. Zhang, P. Sun, J. Chen, and B. Ding, "Pointwise automatic analysis of speckle photographs," *Opt. Eng.*, 30, 382-385 (1991).
 10. Y. Y. Hung, "Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing," *Opt. Eng.* 21, 391-385 (1982).
 11. "레이저 반점 전단간섭계측법을 이용한 타이어의 표면 변형을 측정," 박 병구, 김 진승, 응용물리 1권 3호 230-234 (1988).
 12. 레이저 스펙클 전단간섭계를 이용한 표면변형을 측정, 박 병구, 석사학위논문, 전북대학교 (1986).
 13. G. B. Smith and K. A. Stetson, "Heterodyne readout of specklegram halo interference fringes," *Appl. Opt.* 19, 3031-3033 (1980); K. A. Stetson, "Effect of scintillation noise in heterodyne speckle photogrammetry," *Appl. Opt.* 23, 920-923 (1984).
 14. J. S. Kim, M. Giglio, U. Perini, and S. Muzazzi, "Heterodyne readout system for dual plate speckle photography: analysis of error sources and performance evaluation," *Appl. Opt.* 28, 1862-1868 (1989).
 15. "위상이동 기법을 이용한 반점사진 계측법 I: 이론," 장 덕규, 김 진승, 응용물리 3권 1호, 12-15쪽 (1990).