

◆특집◆ 정밀공학에서의 광계측기술

모아레 현상의 원리와 응용

박윤창\*

The Principle and Applications of Moire Phenomenon

Yoon-Chang Park\*

**Key Words** : Moire Fringe(모아레 무늬), Displacement Measurement(변위측정), In-Plan Displacement(평면변위), Phase Shifting(위상천이), Projection Moire(영사식모아레), Beating(맥놀이효과)

1. 모아레 현상

“모아레(MOIRE)”란 말은 처음으로 프랑스인들에 의해 불려진 단어로써 고대 중국에서 수입된 비단 위에 새겨진 물결무늬(wave pattern)를 일컫는 말이다. 이렇게 불리어지던 모아레는 요즈음에 들어서서 두 개이상의 주기적인 패턴(periodic pattern)이 겹쳐질 때 만들어지는 간섭무늬(interference fringe)를 지칭하는 말로써 다양한 분야에서 매우 광범위하게 사용되어 지고 있다. 이렇듯 물결무늬를 의미하는 불어에서 유래된 모아레 무늬를 좀더 학문적으로 정의를 내리면 비슷한 주기를 갖는 여러 개의 격자가 겹쳐질 때 맥놀이(beatting) 현상에 의해 발생하는 저주파의 고유한 무늬로 정의할 수 있다. 앞서 언급한 모아레 현상으로 설명되어지는 이 모아레 무늬(moire fringe)를 우리는 일상생활에서 어렵지 않게 발견할 수 있다. 겹쳐진 모기장이나 겹쳐져 있는 레이스커튼 등에서 실제로 물체가 가지고 있는 격자 모양 이외에 그보다 넓은 간격을 가지는 새로

운 무늬를 볼 수 있는데 이 무늬가 바로 모아레 무늬이다. Fig.1은 두 개의 방충망이 겹쳐있을 때 관찰되는 모아레 무늬의 예를 보여 주고 있다.

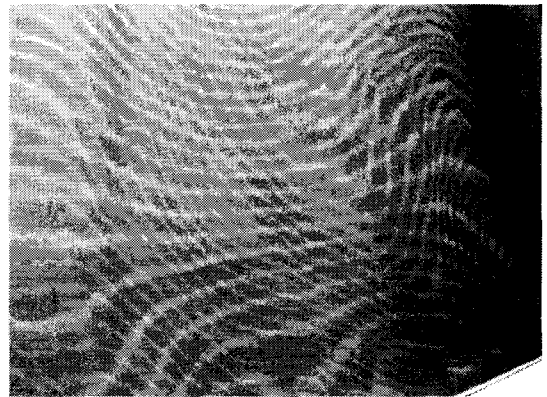


Fig. 1 Moire pattern of insect nets

이 모아레 무늬는 여러 가지 재미있는 성질을 가지고 있다. 그 중에서도 우리가 특히 이 모아레 무늬의 성질에 주목하는 부분은 모아레 무늬의 변화가 실제 물체의 움직임을 상당히 증폭해서 나타낼 수 있는 것과 이 모아레 무늬의 형성과정에 따

\* 선문대학교 기계 및 제어공학부

Tel. 0418-530-2392, Fax. 0418-530-2986

Email ycpark@omega.sunmoon.ac.kr

초정밀시스템설계, 레이저인터페로메터, 3차원형상측정, 공압배어형설계분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

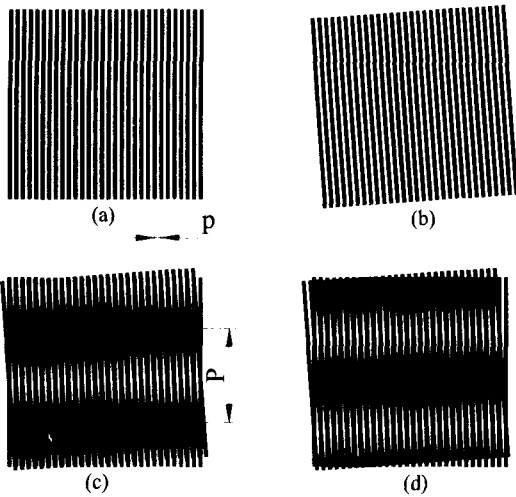


Fig. 2 Displacement amplification effect

라 물체의 형상에 대한 3차원 정보를 가지고 있다는 사실이다.

우선 미소변위 증폭효과를 보기 위해서 Fig. 2를 보면, (a)는 주기가 p인 직선격자이고, (b)는 격자(a)와 동일한 주기를 가지는데 반시계방향으로  $\theta$  만큼 회전되어 있는 상태이다. 이 두 개의 격자를 겹치면 (c)와 같은 모아레 무늬가 얻어지는데 이 모아레 무늬에서의 주기 P는 식(1)과 같은 관계로 격자체의 주기 p보다 월등히 큰 값을 가지게 된다.

$$P = \frac{p}{2\sin(\theta/2)} \quad (1)$$

이 상태에서 격자(a)를 p/2만큼 수평방향으로 이동하면, (d)와 같은 모아레 무늬가 얻어지는데, 결국 격자 자체의 이동량을  $\frac{1}{2\sin(\theta/2)}$  배 만큼 증폭시키는 효과를 가지게 된다.

따라서 이 모아레 현상이 가지는 일반적인 성질을 잘 이용할 경우 우리의 공학 전반에서 물체의 거동해석이나 물체의 비접촉 형상측정 분야에서 많은 응용이 가능해진다.

## 2. 모아레 현상의 공학적 응용

지금으로부터 약 100여전, 1874년에 Lord Rayleigh[1]에 의해서 모아레현상이 과학적인 도구로써 임의의 형상(diffusive object)을 가진 물체의 미세한 움직임의 측정에 유용한 수단으로 제안되고 난 후, 많은 사람들에 의해서 연구가 수행되어져왔다. 1887년Right[2]등에 의해서 격자의 형태에 대한 연구가 이루어 졌으며 원형모양의 격자에 의해서 원운동의 해석에도 모아레현상이 이용될 수 있음이 밝혀졌다. 그런 후 모아레현상에 대한 연구는 1920년대에 다다라 Ronchi[3], Raman[4],Datta[5]등에 의해서 이론적으로 정립이 된다. 1940년대에 이르러 드디어 모아레 현상은 물체의 평면변위(in-plan displacement)를 측정하는데 이용되면서부터 본격적으로 기계공학에서의 스트레인(strain)해석에 응용되어져 그 적용범위를 공학전반으로 넓혀 간다. 1956년 Guild[6-8]등에 의해서 모아레는 격자해석(grating analysis)의 훌륭한 도구로써 스트레인해석에 있어서 강력한 방법으로써 정립이 된다. 이렇듯 평면변위의 측정에만 사용되어지던 모아레현상은 Theocarlis[9-10]등에 의해서 임의의 형상을 가지는 물체(diffusive object)의 3차원 변위측정에 적용될 수 있음이 제안된다. 이를 이어 1970년에 Meadows[11]와 Takasaki[12]등에 의해서 의학적인 목적으로 사람 몸의 3차원형상측정에 응용되어지고 난 후 모아레에 관한 연구는 일대 전기를 맞이하게 된다. 2차원적인 미소변위의 측정에서부터 큰 물체의 3차원형상측정에 이르기까지 그 응용범위는 계속 확대되어 갔다. 그 이후 Nishijima[13-16]등에 의해서 모아레는 렌즈나 유리와 같이 투명하면서 굴절률을 가지는 위상물체(phase object)의 성질 연구에까지 그 응용범위를 넓혀 가게 된다. 모아레현상을 이용한 측정은 그 적용대상에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 1차원적인 변위와 2차원에서의 평면변위 측정을 위한 평면모아레(in-plane moire)와 물체의 3차원적인 변위(out-of-plane displacement)측정을 위한 입체 모아레(out-of-plane moire)가 그것이다. 본 고에서는 이러한 응용분야별 기본원리와 적용 예에 대하여 소개하고자한다.

## 3. 평면변위 측정에서의 응용

### 3.1 일차원 변위 측정

앞 절에서 직선 줄무늬 격자들간의 모아레 무늬가 미소변위를 증폭하게됨을 기술한 바 있다. 이러한 효과를 가장 단순하게 응용한 것이 1차원 변위 측정인데, 이는 Fig. 2(c)에서 형성된 모아레 무늬상에 모아레 무늬의 한 주기 P를 4등분하고, 그 위치에 광량을 감지하는 포토다이오드와 같은 광량센서를 1/4주기마다 4개를 설치하게 된다.

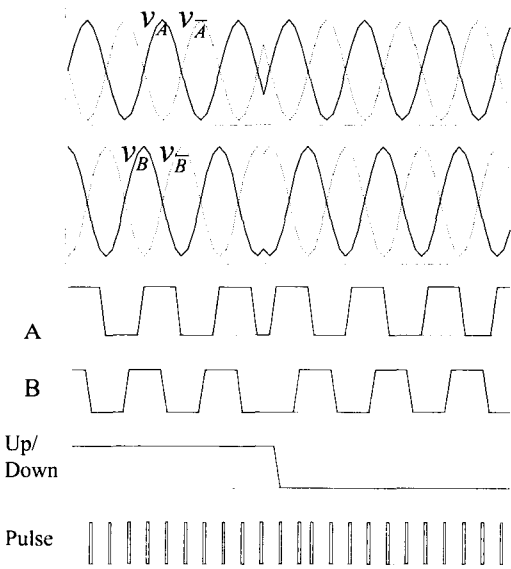


Fig. 3 Signal of liner encoder

이렇게 하면, 격자(a)가 1주기 p만큼 움직일 때마다 Fig. 3에서와 같이 4개의 광량센서에서는 입사되는 광량에 비례하는 전압  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_{A'}$ ,  $V_{B'}$ 가 각각 출력되게 된다. 또한,  $V_A$ 와  $V_{A'}$  그리고  $V_B$ 와  $V_{B'}$ 를 각각 비교하여 90° 위상차가 나는 두 개의 ON/OFF

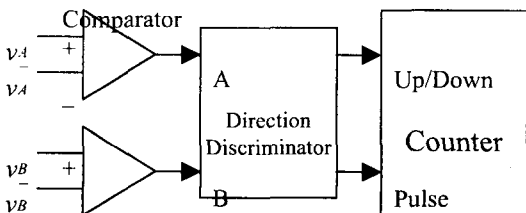


Fig. 4 Electronic circuit of encoder

형태의 신호 A와 B를 얻게된다. 이 신호들은 격자의 이동방향이 변함에 따라서 신호간의 위상이  $\pm 90^\circ$ 로 변하기 때문에 격자의 방향을 판별할 수 있고, 또한 A,B신호의 ON/OFF 상태가 변화할 때마다 펄스를 발생시키기 때문에 격자 자체의 주기보다 4배로 조밀한 펄스를 얻게된다. 이러한 과정으로 만들어지는 펄스와 위상신호가 UP/DOWN 카운터에 입력되어 격자의 이동방향과 격자주기보다 4배로 정밀한 변위량을 알 수 있게 된다.

이상과 같이 1차원적인 변위를 측정하는 수단으로 응용되고 있는 기술은 현재 격자자체의 한 주기 p를 거의 100분할하는 수준에 이르고 있다.

### 3.2 이차원 변위 측정

평면상의 2차원 변위를 측정하는 가장 간단한 방법은 앞서 언급한 직선 줄무늬 격자를 서로 직각으로 배치하면 가능할 것이다. 이러한 양식의 2차원 변위 측정장치는 광학식 리니어 엔코더를 직각으로 설치한 X-Y테이블에서 쉽게 찾을 수 있다. 하지만, 한 쌍의 격자를 이용하여 2차원 변위를 측정하는 방법에는 여러 가지 형태의 격자들이 이용되고 있는데, 이들의 대부분은 동심원 격자들로 되어 있다.

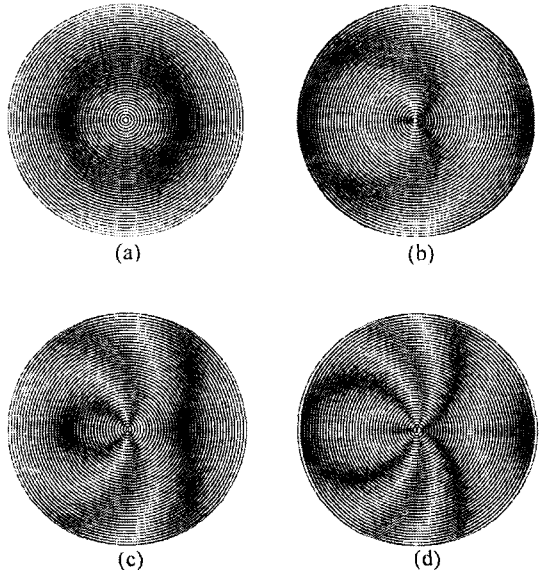


Fig. 5 Moire fringe with circular gratings

Fig. 5는 동심원 격자들이 겹쳐졌을 때 나타나는 모아레 무늬의 예를 보여주고 있다. 여기에 사용된

격자는 최대 반경이 R로서 동일하게 되어 있는데, 격자 G1은 등간격으로 30개의 동심원으로 구성되어 있으며, 격자 G2는 등간격으로 31개의 동심원으로 구성되어 있다. Fig. 5(a)는 두 개의 동심원 격자 G1과 G2가 완전히 겹쳤을 때, 즉, 중심이 일치했을 때의 모아레 무늬이고, Fig. 5(b), (c), (d)는 각각 격자 G1이 격자 G2에 대해서 0.5피치, 1.0피치, 1.5피치만큼 왼쪽으로 편심된 상태에서 나타나는 모아레 무늬를 보여주고 있다. 이들 모아레 무늬의 특징을 살펴보면, 격자의 이동방향에 대해서 항상 대칭의 모아레 무늬를 형성하고 있으며, 격자의 한 주기 이상을 이동하여도 모아레 무늬가 동일하게 반복되지 않는다는 것을 알 수 있다. 이 특징을 이용하면, 두 격자간의 상대적인 편심량과 편심방향을 알 수 있게 된다.

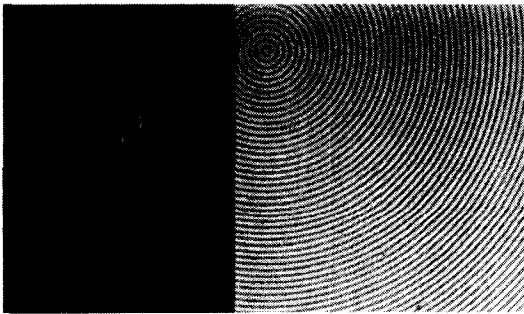


Fig. 6 Concentric circular grating

Fig. 6은 이러한 원리를 구현하기 위해서 제작된 동심원 격자의 실물 사진인데, 반경 0.8mm안에

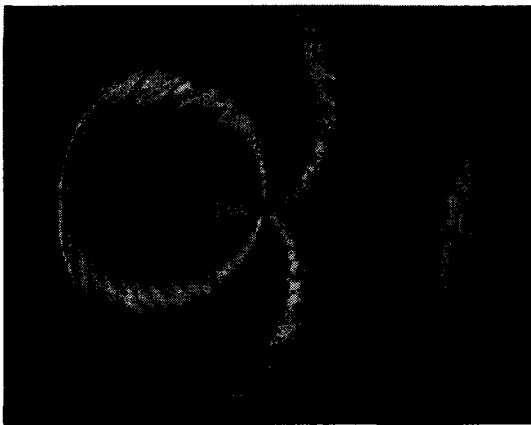


Fig. 7 Moire fringe (N=100)

등간격으로 100개의 동심원을 새겨서 만든 것이다. Fig. 7은 이 동심원 격자에서 형성된 모아레 무늬를 보여주고 있는데, 여기서는 격자 자체의 동심원은 보이지 않고, 모아레 무늬만 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고, 이 격자를 이용하여 2차원 변위측정 실험을 한 결과 0.015mm구간에서 32nm의 정확도와 8nm의 반복능이 확인되었다[17].

#### 4. 삼차원 형상측정에의 응용

3차원형상을 측정하는데 있어서, 측정대상물의 종류에 따라서 크게 두 가지로 나누어 질 수 있다. 형상의 대부분이 평면의 조합으로 구성되는 기하학적형상과 자유곡면으로 구성되어 있는 자유곡면형상으로 구별될 수 있다. 과거 대부분의 제품들에서 취급의 용이성 때문에 평면을 주로 하는 기하학적인 형상이 사용되어져 왔다. 그러나 근래에 들어서 소비자의 성향이 미적감각을 중시하는 분위기로 흘러가면서 자유곡면과 같은 형상을 채택하는 비중이 급속히 늘어나고 있다. 과거 기하학적형상의 경우에는 기존에 보편화되어 있는 삼차원 좌표측정기에서 형상을 정확하고 신속하게 측정하는 것이 가능하였다. 하지만, 자유곡면형상을 삼차원 좌표측정기에서 측정할 경우 측정점의 수가 대폭적으로 늘어나기 때문에 측정시간이 과다하게 소요되는 문제점이 생기게되었다. 또한 사람의 인체형상 측정을 기존의 방식에서와 같이 접촉식으로 측정할 경우 측정시에 작용하는 측정력이 측정대상물의 형상을 변화시키는 등의 문제가 발생하게 된다.

이러한 문제점 제거와 함께 1980년대 후반에 이르러 3차원 형상측정기술은 고정밀화, 고속화 그리고 비접촉화의 방향으로 발전해 왔다. 이러한 3차원 형상측정기술을 과거 접촉식 3차원 좌표측정기(CMM :Coordinate Measuring Machine)에 전적으로 의존하다가, 광전자복합기술의 현격한 발달로 인하여 물리학에서의 광학이론들이 실제 측정 시스템에서 손쉽게 구현되어지면서부터 급속하게 발전하게 된다. 특히 비전을 이용한 비접촉 3차원 형상측정법은 사용에 있어서의 편리성과 측정대상에 손상을 입하지 않는 등 많은 장점들로 인하여 활발한 연구가 수행되어져 왔다. 광삼각법(optical triangulation), 광촉침법(optical profilometry), 동초점 현미경(confocal micro scopy), 모아레토포그래피

(moire topography)등 다양한 분야에서 많은 연구가 진행되어져 왔다.

그 가운데서도 특히 모아레법은 측정영역대비 높은 측정분해능을 가질 수 있는 장점을 가지고 있어 많은 사람들의 관심을 모았다. 하지만 실제 구현을 함에 있어 수평방향으로의 낮은 측정분해능, 간섭무늬해석의 제한점, 절대형상측정의 어려움 등이 뒤따라 아주 제한적으로 사용이 되어졌다. 본 글에서는 삼차원형상측정에서 모아레 현상이 어떻게 사용되고 있는지를 살펴보고, 최근의 기술들을 간략히 소개하고자한다.

#### 4.1 그림자식 모아레

그림자식 모아레법은 측정하고자하는 물체의 바로 앞에 기준 격자를 위치시키고 조명을 하게되고, 일정한 각도를 가지고 이를 관찰함으로써 기준 격자와 측정물체위에 형성된 기준격자의 그림자가 겹쳐진 영상을 얻게되는데, 이 영상에는 두 개의 격자가 겹쳐진 때 나타나는 모아레 무늬가 담겨있다.

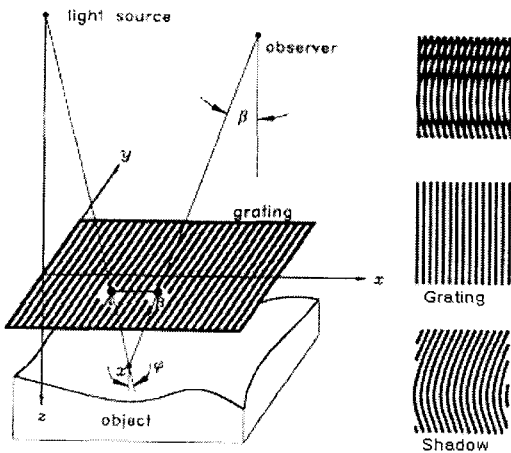


Fig. 8 Principle of shadow moire

여기서 얻어진 모아레 무늬에는 측정대상물의 형상에따라 결정되는 격자의 그림자영상이 포함되어 있기 때문에 이 모아레 무늬를 해석함으로써 측정대상물의 형상 정보를 얻을 수 있다. Fig. 9는 입술모양 석고상에서 그림자식 모아레법으로 얻어진 영상이다.

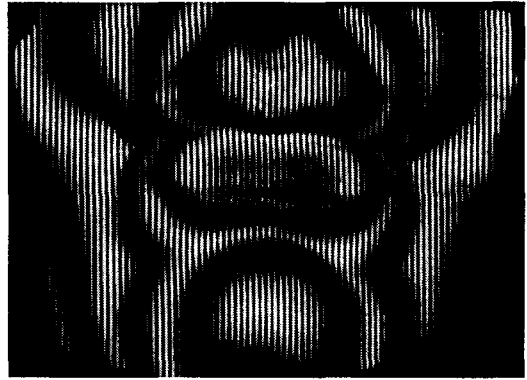


Fig. 9 Moire fringe by shadow moire

이러한 모아레 무늬의 해석에서는 전통적으로 간섭무늬 추적(fringe contouring)이 사용되기 때문에 측정분해능이 떨어지게 된다. 그러나 현재는 푸리에 변환이나, 위상천이(phase shifting)등의 방법으로 측정분해능을 향상시키고 있으며, 얻어진 영상에서 측정대상물의 형상과는 관계가 없는 기준격자의 영상을 없애기 위해서 모아레 무늬 획득시간동안 기준격자를 이동시키는 방법등이 적용되고 있다. 그리고, 그림자식 모아레법에서는 측정원리에서 알 수 있듯이 측정대상물의 측정영역 전체를 덮을 수 있는 크기의 정밀한 기준격자가 필요하기 때문에 주로 측정대상물이 작을 때 사용되고 있는데, Fig. 10은 이러한 그림자식 모아레법을 사용하면서 광원, 측정대상물과 카메라를 그대로 두고 격자를 Z축방향으로 위상천이 시키는 그림자식 위상천이법으로 측정된 결과이다.



Fig. 10 Measurement result by shadow moire

#### 4.2 영사식 모아레

영사식 모아레는 그림자식 모아레와는 달리 기준격자를 물체와 근접하게 위치하는 것과는 달리

영사기를 이용해서 측정하고자하는 물체면에 격자를 투영시킨다. 그리고 측정물체에 투영된 변형격자의 영상을 결상렌즈를 이용하여 기준격자위에 결상시키고, 이때 변형격자의 영상과 기준격자의 영상이 겹쳐져서 발생하는 모아레 무늬를 카메라로 포착하게된다. Fig. 11은 이러한 영사식 모아레법을 위한 광학계의 예를 보여주고 있다[18].

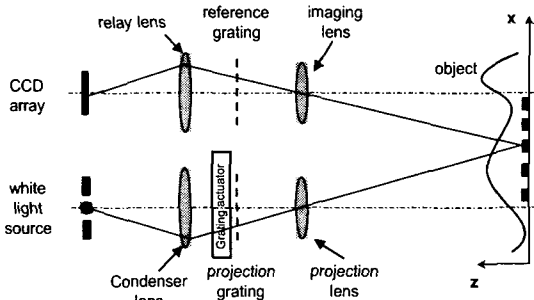


Fig. 11 Configuration of projection moiré

이 광학계는 크게 영사광학계와 결상광학계로 나누어지는데, 영사광학계에는 광원, 집광렌즈, 영사격자 그리고 영사렌즈로 구성되어 있고, 결상광학계는 측정대상물에 생긴 변형격자의 영상을 기준격자위에 결상하기 위한 결상렌즈, 기준격자, 릴레이렌즈 그리고 영상입력장치인 CCD카메라로 구성되어 있다. 또한, 여기에 사용된 영사격자와 기준격자는 위상천이법을 적용할 수 있도록 위상이 각각 다른 3쌍 혹은 4쌍으로 이루어져 있으며, 동시에 격자 이송장치가 들어 있어서 격자를 이송시켜 모아레 무늬에 위상천이를 주고 있다. Fig. 12는 이러한 영사식 모아레법으로 측정된 결과의 한 예이다.

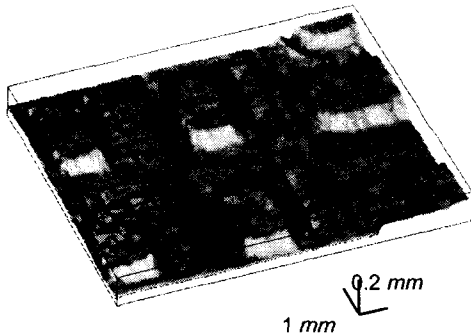


Fig. 12 Measurement result of a circuit board by projection moiré

이러한 영사식 모아레법을 위한 광학계는 위상천이를 위해서 격자의 수가 많아져야하고, 또한 격자이송장치가 필요하기 때문에 구조가 복잡해지고 규모가 커져야한다. 그래서 최근에 들어서는 영사광학계에 액정을 채용하여 격자를 프로그램으로 설정할 수 있도록하는 방식이 연구되고 있으며, 결상광학계에 들어있는 기준격자를 PC에서 생성시키는 방법등의 구조 단순화를 위한 여러가지 시도가 진행되고 있다.

이러한 시도의 한 예로서 측정대상물이 위치하는 곳에 먼저 평면을 놓고, 평면상의 각 위치에서의 위상, 즉 기준위상을 측정한다. 다음, 평면이 놓였던 위치에 측정물을 놓고 측정물의 위상을 측정한다. 이렇게 얻어진 측정물 위상에서 기준위상을 빼서 모아레 위상(무늬)을 구하는 방법이 연구되고 있는데, 이 경우에는 기준격자가 필요없기 때문에 구조 단순화가 용이한 장점이 있다. Fig. 13은 이런 과정으로 모아레 무늬를 얻는 과정에서의 기준위상( $\phi_r$ ), 측정물위상( $\phi_o$ ), 그리고 이들의 차에서 구해진 모아레 위상( $\phi_m$ )을 보여주고 있다[19].

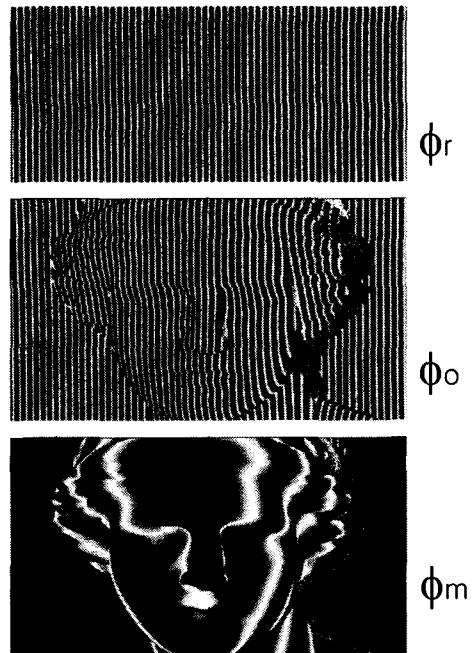


Fig. 13 Difference phase between  $\phi_o$  &  $\phi_m$



Fig. 14 Result by difference phase moire

### 5. 결 론

본 글에서는 우리 생활 주변에서 흔히 발견될 수 있는 모아레 현상의 발생원리, 모아레의 성질 그리고 응용분야에 대해서 간략히 기술해 보았다.

모아레 무늬의 미소변위 증폭효과와 삼차원형상정보를 가지는 성질이 공학분야에서 평면변위 측정 및 삼차원형상측정에 적용되고 있는데, 이들 분야의 기술은 자유곡면 사용빈도 증가와 함께 계속 새로운 기술이 개발되고 있으며, 응용분야도 급속히 확대되고 있어서 공학자들의 지속적인 관심이 모아질 것으로 예상된다.

내용을 기술하는 과정에서 세부적인 내용까지 들어가게 되면 지나치게 많은 수식을 인용하게 되어 지면관계상의 어려움을 양해바랍니다.

### 참고문헌

1. Lord Rayleigh, *Philos. Mag.* 47, 81 (1874); 47, 193 (1874).

2. A. Righi, *Nuovo Cimento* 21, 203 (1887); 22, 10 (1888).

3. V. Ronchi, *Attualita Scitifiche*, No. 37, N. Zanidelli, Bologna, 1925, Chap. 9.

4. C. V. Raman and S. K. Datta, *Trans. Opt. Soc.* 27, 51 (1925-1926).

5. S. K. Datta, *Trans. Opt. Soc.* 28, 214 (1926-1927).

6. G. A. Brewer and R. B. Glassco, *J. Aero. Sci.* 9, No. 1 (1941).

7. R. Weller and B. M. Shephard. *Proc. Soc. Experimental Stress Analysis* 6, 35 (1948)

8. J.Guild, *The Interference System of Crossed Diffraction Gratings*, Clarendon,Oxford, 1956.

9. P. S. Theocaris, *Moire Fringes in Strain Analysis*, Pergamon, London, 1969.

10. A. J. Durelli and V. J. Parks, *Moire Analysis of Strain*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1970.

11. D. M. Meadows, W. O. Johnson, and J. B. Allen, *Appl. Optics* 9, 942 (1970).

12. H. Takasaki "Moire Topography" *Appl. Opt.* Vol.9 No. 6, (1970).

13. Y. Nishijima and G. Oster, *J. Opt. Soc. Am.* 54, 1 (1964).

14. S. Yokozecki and T. Suzuki, *Appl. Optics* 10, 1575 (1971).

15. A. W. Lohmann and D. E. Silva, *Optics Commun.* 2, 1690 (1971).

16. O. Kafri, *Opt. Lett.* 5, 555 (1980).

17. Yoon-Chang Park and Seung-Woo Kim, "Determination of two-dimensional planar displacement by moire fringes of concentric-circle gratings", *Appl. Opt.* Vol.33, No.22, (1994).

18. 김승우, 최이배, 오정택, 정문식, "위상천이격자를 이용한 영사식모아레," 대한기계학회논문집, 제 22권, 5호, pp.850-857, (1998).

19. 박윤창, 정경민, "평행 광축에서의 위상측정 형상측정법에 관한 연구", 한국정밀공학회, Vol.17, No.6 (2000).