

모아레 광간섭에 의한 금형 형상의 삼차원 자동측정과 CAD/ CAM과의 연계



김 승 우

한국과학기술원 정밀공학과 교수

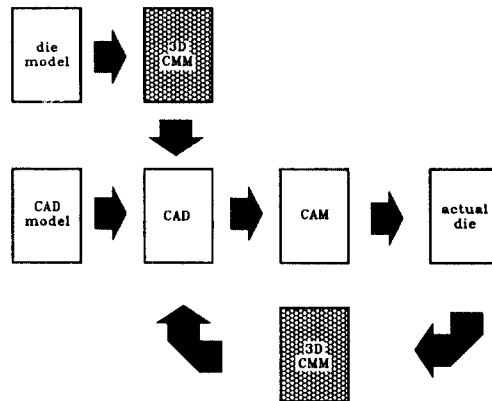
●1955년생
●정밀측정시스템과 초
정밀 측정 및 구동 기술
에 관한 교육과 연구를
수행하고 있다.

1. 삼차원 측정과 금형가공

금형가공에서 CAD/CAM과의 효율적인 연계를 위해서는 측정의 자동화가 중요한 위치를 갖고 있다. 그림 1에 보인 바와 같이 CAD/CAM 기술은 컴퓨터에서 설계된 표현형상 정보를 자동으로 가공하기 위해 직접 기계에 연결하는데 효율적으로 이용되고 있다. 일반적으로 실제로 사용되는 금형을 만들기 전에 설계된 형상을 클레이(clay)로 만들어 평가하게 된다. 만일 이 모형의 수정이 요구되면 만족할 때까지 수정하여야 한다. 이렇게 수정된 표면형상 정보는 실제 목형을 자동으로 가공하기 위하여 CAD/CAM 컴퓨터로 보내야 한다. 그러나 표면의 형상은 단순히 수학적 수식에 의해 표현될 수 없다. 따라서 표면의 형상을 디지털화(digitizing)에 의해서 얻어지거나, 비생산적인 모방밀링 공정을 통해 가공하여야 한다.

현재는 클레이모형(clay model)을 디지털화하기 위하여 3차원 측정기를 중심으로 하는 접촉식 방법이 주로 사용되고 있다. 그러나 이러한 방법은 측정시간을 매우 많이 소요하므로 생산성 측면에서 병목적(bottle neck) 장애를

가지고 있다. 이러한 문제점들 때문에 접촉식 측정방법을 대체하려는 많은 방법들에 대한 연구가 전 세계적으로 널리 진행되고 있다. 따라서 이 글에서는 광전자기술을 이용하여 모아레 현상을 응용한 3차원형상을 측정하는 새로운 이론을 제시하고, 또한 기존의 모아레토포그래피를 이용하여 금형의 3차원 곡면을 측정할 수 있는 방법을 제안하고, 실제로 적용하여 측정을 하였다. 그 결과로부터 모아레토포그래피가 3차원형상 측정에 매우 효율적이며 금형곡면이



* CMM(Coordinate Measuring Machine)

그림 1 3 D CMM을 이용한 개선된 CAD/CAM에 의한 금형제작

아닌 다른 많은 분야에 응용이 가능함을 알 수 있었다.

삼차원형상을 측정하기 위한 모아레현상은 물리학의 광학분야에서 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔으며 수학적 이론의 기본 체계가 정립되어 온 상황이다. 더욱이 최근에는 모아레현상의 공학적인 응용을 가능케 하는 광전자 분야에서의 디지털 영상처리와 관련된 하드웨어가 급진적으로 발전하고 있어, 물리광학분야에서 확립된 이론과 광전자분야의 하드웨어와 소프트웨어를 효율적으로 접목시켜 컴퓨터를 이용한 시스템 기술을 부여할 경우 모아레현상의 성공적인 공학적 응용이 가능하리라 믿어지고 있다.

2. 모아레토포그래피

2.1 모아레무늬

모아레무늬(moire fringes)의 발생은 공간적 개념에서 맥놀이 현상으로 설명될 수 있다. 비슷한 주기를 갖는 두 개의 격자무늬를 중첩시키면 간섭이 발생하여 원래의 격자무늬에 비하여 훨씬 큰 주기를 갖는 모아레무늬가 형성된다. 이러한 모아레무늬로부터 3차원 표면형상을 산출하는 방법을 모아레토포그래피(moire topography)라 한다.

삼차원 형상측정에 모아레현상을 응용하려면 두 개의 격자무늬가 필요하다. 한 격자무늬는 측정에 대한 기준설정에 필요한 기준격자(reference grating)로 측정하는 표면의 형상에 무관하게 일정하다. 반면에, 또 하나의 격자는 측정하려는 표면형상의 정보를 가지고 있는 격자로 변형격자(deformed grating)라 한다. 기준격자무늬 모양은 간격이 일정한 줄무늬, 정다각형 등의 주기성을 갖는 격자 등에서 모두 가능하나, 등간격의 평행한 줄무늬를 사용할 경우가 해석이 가장 쉬워 모아레토포그래피를 이용한 삼차원형상 측정에는 기준격자로 등간격의 줄무늬가 주로 사용된다. 이러한 기준격자와 변형격자를 중첩시키면 그림 2에서 보는

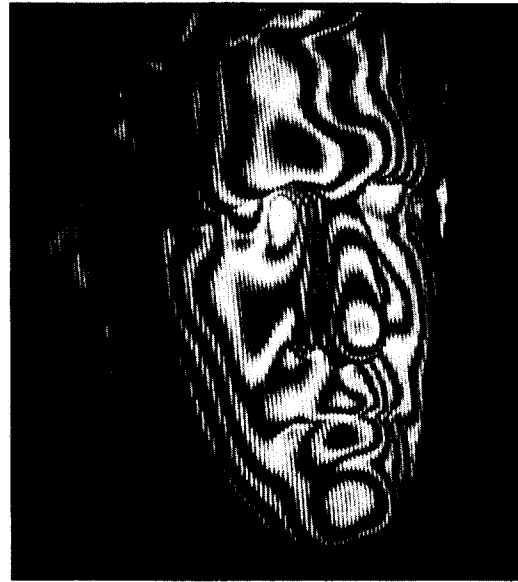


그림 2 모아레무늬

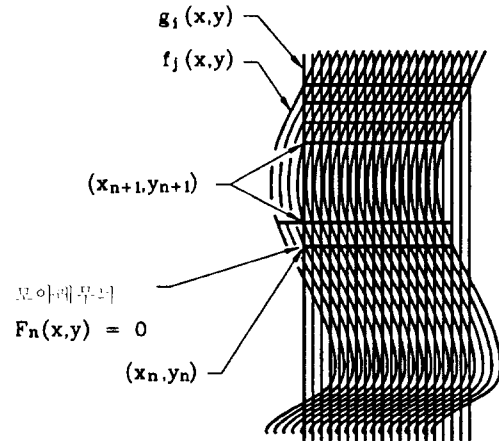


그림 3 두 격자의 중첩

바와 같은 모아레무늬를 얻을 수 있다. 이 모아레무늬는 광학시스템의 기하학적 조건에 따라 측정물체의 등고선이 될 수 있다.

그림 3은 두 격자선을 중첩하였을 경우 모아레무늬는 어떻게 형성되는가를 보여준다. 기준격자는 $g_i(x,y)=0$ 으로 표현되는 선균이고, $f_j(x,y)=0$ 으로 표현되는 변형격자는 기준격자를

측정물체에 영사되었을 경우 물체의 표면형상에 따라 변형된 무늬이다. 두 격자를 동시에 보면 두 격자가 교차하는 점에서의 빛의 강도가 가장 선명하므로 모아레무늬가 형성된다. 모아레무늬는 여러 겹으로 관측되며 각각의 무늬에 대한 절대차수(absolute order)는 식(1)과 같이 결정된다.⁽⁸⁾

$$n = i - j \quad (1)$$

여기서 i 와 j 는 각각 기준격자와 변형격자선의 번호로 정수값으로 정의된다.

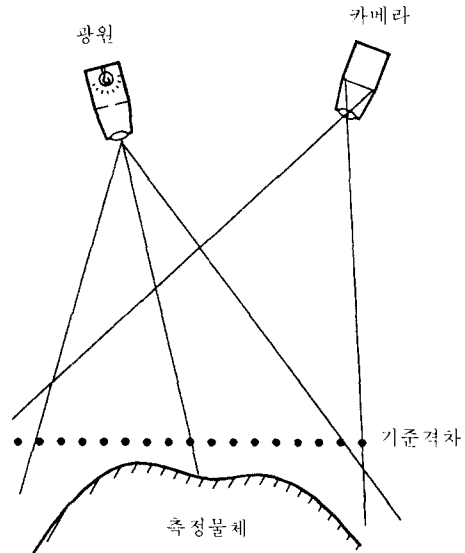
2.2 그림자식 모아레토포그래피

모아레토포그래피를 실제응용을 위해 사용될 수 있는 방법은 모아레무늬의 형성방법에 따라 크게 그림자식(shadow type)과 영사식(projection type)의 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저 그림자식 방법은 그림 4에서 보는 바와 같이 측정하고자 하는 물체 가까이에 기준격자를 놓고 빛을 입사시키면 표면형상에 따라 격자의 변형된 그림자가 측정표면에 형성된다. 이 그림자무늬를 다시 기준격자를 통해서 관측하면 두 격자 사이에 간섭이 발생하여 모아레무늬가 형성된다. 모아레무늬의 가시성을 좋게 하기 위하여 가능한 기준 격자를 물체 가까이에 놓아야 하며, 빛이 격자에 입사되었을 때 투과도가 정현함수가 되도록 하기 위하여 원형단면을 갖는 선(wire)을 사용하는 것이 바람직하다. 광원은 모아레무늬의 가시성을 좋게 하기 위하여 점광원(point source)을 사용하거나 평행광을 사용한다. 그림자식의 모아레무늬를 나타내는 일반식은⁽⁹⁾ 다음과 같이 얻어진다.

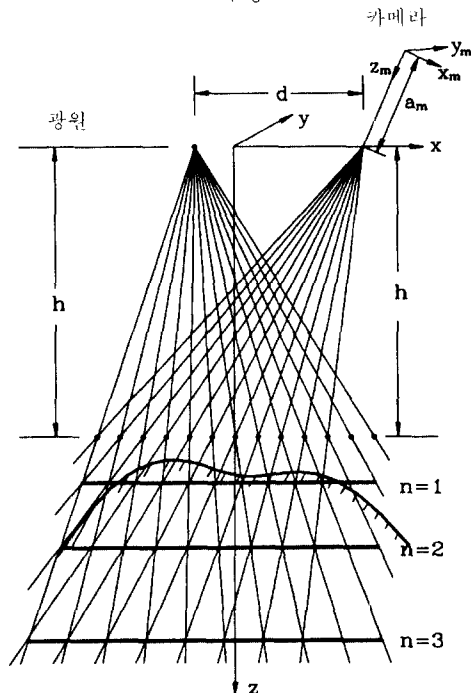
$$z^2(d - np) + z[dh_1 + x(h_2 - h_1) - np(h_1 + h_2)] - nph_1h_2 = 0 \quad (2)$$

여기서 h_1 과 h_2 는 각각 광원과 기준격자 그리고 관측자와 기준격자면 사이의 거리이다. 또한 p 는 격자선 사이의 간격이며, d 는 광원과 관측자 사이의 기준격자면에 대한 수평거리로 주어진다. 좀더 구체적으로 그림 4(b)에서와

같은 조건하에서는 모아레무늬의 차수와 표면형상의 좌표 사이의 관계는 다음과 같이 얻어진다.



(a) 구성도



(b) 좌표시스템과 모아레무늬
그림 4 그림자식 모아레 토포그래피

$$z = \frac{np h}{d - np} + h \quad (3)$$

$$x = \frac{z}{a_m} x_m \quad (4)$$

$$y = \frac{z}{a_m} y_m \quad (5)$$

여기서 a_m 은 영상면에서의 좌표계와 공간상의 좌표계 사이의 거리이다. 또한 이 경우 인접한 두 모아레무늬 사이의 상대적인 높이차는 식 (3)으로부터 식 (6)과 같이 유도된다.

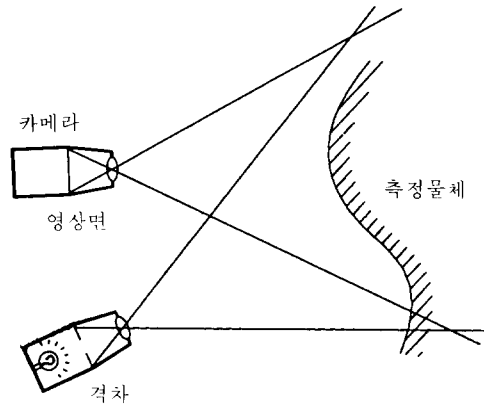
$$\Delta z = \frac{dph}{(d - np)[d - (n+1)p]} \quad (6)$$

위 식에서와 같이 상대적인 높이차는 모아레무늬의 절대차수에 영향을 받으므로 정확한 측정을 위해서는 절대차수의 파악이 중요하게 된다. 이러한 이유로 그림자식 모아레 방법은 비교적 수동적평가로 응용이 한정되며, 또한 측정범위가 빛의 회절효과에 의해 제한되는 단점을 갖는다.

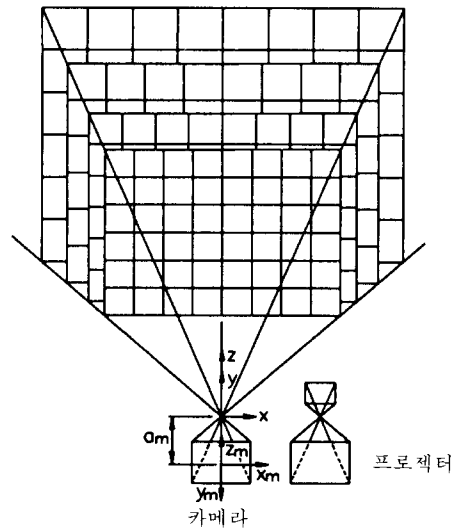
2.3 영사식 모아레토포그래피

영사식은 그림자식에서 언급된 빛의 회절에 의한 영향을 최소화할 수 있는 장점을 갖는다. 이 방법의 특징은 모아레무늬를 형성시키는 방법에 있어서 그림 5에서와 같이 기준격자를 환등기를 사용하여 물체에 투사시킨다. 그리고 측정물체상에 형성된 변형 격자만을 카메라에 의하여 관측한 후, 모아레무늬는 영상처리기법을 이용하여 컴퓨터내에서 소프트웨어로 형성시킨다. 따라서 오차가 발생할 수 있는 요인들을 최소화하고 측정범위와 분해능을 그림자식보다 향상시킬 수 있는 장점을 갖는다. 그림 5(a)는 영사식의 개략도이고, 그림 5(b)는 영사식의 모아레무늬가 등고선이 되는 특별한 경우의 기하학적 조건을 보여준다. 이 경우 모아레무늬와 표면형상 높이 사이의 관계는 식 (7), (8)과 같이 구해진다.⁽⁶⁾

$$z = \frac{a_m h}{np} + h \quad (7)$$



(a) 구성도



(b) 좌표시스템과 등차수면

그림 5 영사식 모아레토포그래피

$$x = \frac{z}{a_m} x_m \quad (8)$$

$$y = \frac{z}{a_m} y_m \quad (9)$$

이 경우에서도 두 인접한 모아레무늬 사이의 높이차는 다음과 같이 얻어지며 그림자식에서와 같이 절대차수에 의존하게 된다.

$$\Delta z = \frac{amh}{n(n+1)p} \quad (10)$$

2.4 주사식 모아레토포그래피

주사식 모아레토포그래피 (scanning moire topography)⁽¹¹⁾는 영사식의 개선형으로 모아레차수 등의 산출이 용이한 장점을 갖고 있는 방법이다. 이 주사식을 아래에 제시한 방법으로 하여 모아레무늬를 얻으면 두 인접한 모아레무늬의 간격을 일정하게 할 수 있다. 이는 영사식에서의 점광원에 의한 변형격자 생성을 그림 6에서와 같이 레이저를 슬릿 (slit) 형태로 만들어 측정하려는 표면에 주사시키면서 일정한 간격만큼 수평으로 이동한다. 주사는 두번에 걸쳐 각각 다른 영상을 갖고 수행되어 모아레간섭을 위한 두 개의 영상을 얻는다. 그림 6에서와 같이 기하학적인 조건에서 주사되는 슬릿형 광선의 식은 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$z = (x - n_1 p_1) \cot \theta_1 \quad (11)$$

$$z = -(x - n_2 p_2) \cot \theta_2 \quad (12)$$

여기서, n_1 과 n_2 는 각각의 변형격자의 격자선의 번호이며, p_1 과 p_2 는 각각 변형격자의 주사 간격이다. 그러면 모아레차수는 $n = n_2 - n_1$ 로 결정되며 식(11)과 식(12)에서 기준면에서 표면의 높이 z 는 다음과 같이 얻어진다.

$$z = \frac{n_2 p_2 - n_1 p_1}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \quad (13)$$

위 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

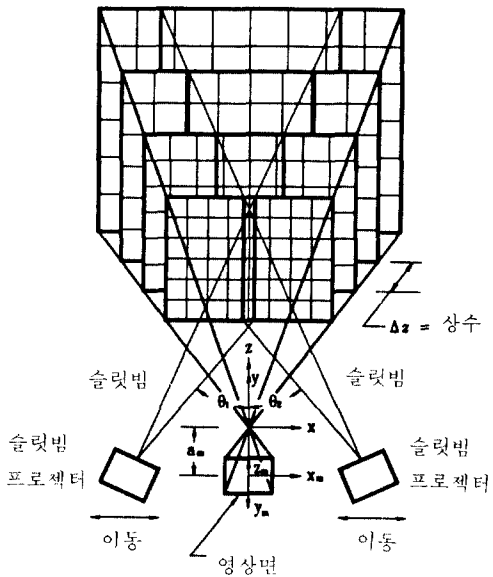
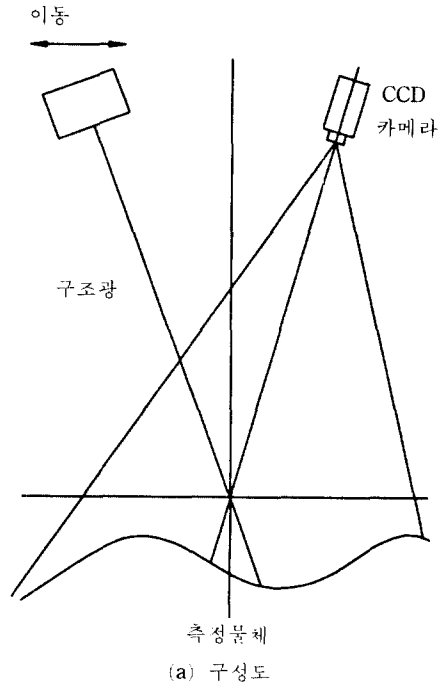
$$z = \frac{n p_1 - n_2 (p_1 - p_2)}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \quad (14)$$

식(11)과 (12)로부터 변형격자 2의 격자선의 번호 n_2 는 다음과 같이 얻어진다.

$$n_2 = \frac{(\tan \theta_1 + \tan \theta_2) x + n p_1 \tan \theta_2}{p_2 \tan \theta_1 + p_1 \tan \theta_2} \quad (15)$$

식(15)를 식(14)에 대입하여 측정표면의 높이를 모아레차수 n 의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$z = \frac{p_2 - p_1}{b} x + n \frac{(p_1 - p_2) p_1 \tan \theta_2 + p_2 b}{ab} \quad (16)$$



(b) 좌표시스템과 등차수면
그림 6 주사식 모아레토포그래피

여기서, 상수 a 와 b 는 각각 $a = \tan \theta_1 + \tan \theta_2$ 와 $b = p_2 \tan \theta_1 + p_1 \tan \theta_2$ 로 주어진다. 또한 식(16)에서 x 는 다음과 같다.

$$x = \frac{x^2(h+z)}{a_m} \quad (17)$$

위식을 식 (16)에 대입하여 정리하면 최종적으로 높이는 다음과 같이 산출된다.

$$z = \frac{(p_2 - p_1)(ax''h - na_m p_1 \tan \theta_2) + na_m p_2 b}{a[ba_m - x''(p_2 - p_1)]} \quad (18)$$

따라서, 모아레무늬가 형성된 측정표면의 공간상의 좌표는 다음과 같다.

$$X = \frac{Zx''}{a_m} \quad (19)$$

$$Y = \frac{Zy''}{a_m} \quad (20)$$

$$Z = z + h \quad (21)$$

이 경우, 같은 x 축 위치에서 인접한 두 모아레무늬 사이의 높이차는 식(21)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\Delta Z = \frac{(p_1 - p_2) p_1 \tan \theta_2 + p_2 b}{ab} \quad (22)$$

만일 두 변형격자의 주사선의 간격 $p = p_1 = p_2$ 이라면 측정표면의 높이는 식(21)로부터 다음과 같다.

$$Z = z + h = \frac{np}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} + h \quad (23)$$

식(23)에서 보면 표면의 높이는 두 변형격자를 주사시키는 각도와 주사간격 p 에 의존하나 이러한 값들은 상수이다. 그리고 표면의 높이는 수평좌표에 의해 영향을 받지 않고 변수인 모아레차수에만 의존하므로 모아레무늬는 측정표면의 등고선이 된다. 또한 이 경우 인접한 두 모아레무늬 사이의 높이차는 식(22)로부터 다음과 같다.

$$\Delta Z = \frac{p}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \quad (24)$$

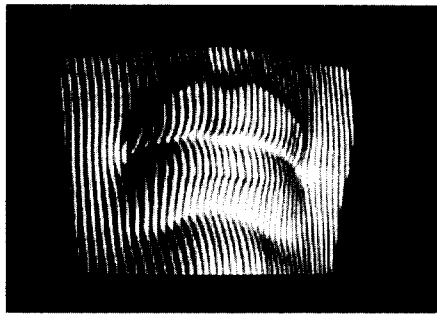
위 식에서부터 두 인접한 모아레무늬 사이의 높이 차는 p , θ_1 , θ_2 에 의존한다. 만일 두 각도 θ_1, θ_2 를 작게 하면 좀더 조밀한 모아레무늬

를 얻을 수 있으나 측정할 수 있는 시야가 좁아지므로 적당한 절충이 필요하다. 그리고 격자 주사간격(p)를 작게 함으로써 보다 조밀한 모아레무늬를 얻을 수 있으나 이러한 간격은 주사선의 폭과 영상카메라의 분해능에 의해 한정된다. 특히 위와 같은 조건($p_1 = p_2$) 하에서는 표면의 높이는 카메라에 관련되어 있는 변수 등에는 독립적으로 산출이 가능하고 수평좌표만이 영향을 받는다.

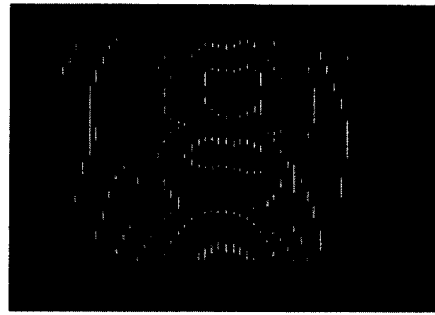
3. 모아레무늬에 대한 영상처리

모아레무늬는 컴퓨터 내에서 영상처리를 통해 유출할 경우 일반적으로 사칙연산 중에서 곱셈, 뺄셈, 덧셈 과정 등을 통해 두 격자무늬를 연산을 통해 얻을 수 있다. 이러한 과정 중에서 곱셈과정은 비선형연산으로 많은 계산시간을 요구한다. 반면, 덧셈과 뺄셈연산은 수학적으로 선형적 연산인 장점을 갖으나 실제로 응용하기 위해서는 현실적인 문제 등이 고려되어야 한다. 광학적으로 뺄셈연산에 의해 발생이 가능한 음의 빛의 강도는 실제로 존재하지 않으므로 이들 두 격자무늬 사이의 강도차의 절대값을 뺄셈연산의 결과로 간주한다. 덧셈의 경우는 가시성이 다른 두 가지 방법에 비해 나쁘지만, 쉽게 응용이 가능한 장점을 갖는다.

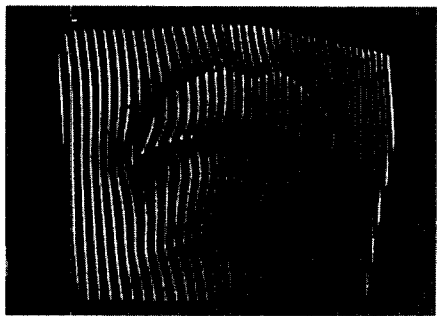
그림 7은 영사식의 경우 영상처리를 이용한 곡면의 측정과정을 단계별로 보여준다. 그림 7(a)에서 우선 측정하고자 하는 물체에 격자무늬를 투영시키고 카메라로 변형격자의 화상을 잡아 저장을 한다. 저장된 화상에서 조명효과를 제거하기 위하여 원화상을 평활화처리를 하고 다시 이를 원화상에서 빼 조명의 위치에 따른 효과를 제거한 그림 7(b)와 같은 화상을 얻는다. 이 화상을 영상처리의 이진화법과 선택화기법을 이용하여 그림 7(c)와 같이 처리한다. 그리고 추적방식을 사용하여 각 변형격자선의 번호를 매기고 소프트웨어에 의해 처리하면 그림 7(d)와 그림 7(e)와 같은 모아레무늬를 얻을 수 있고 이에 보간방법을 적용하면 그



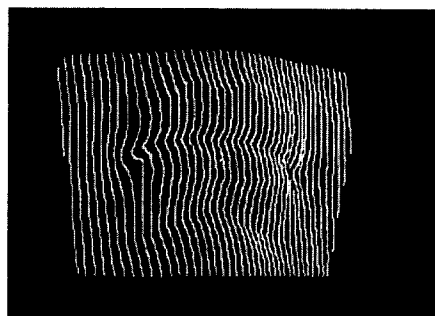
(a)



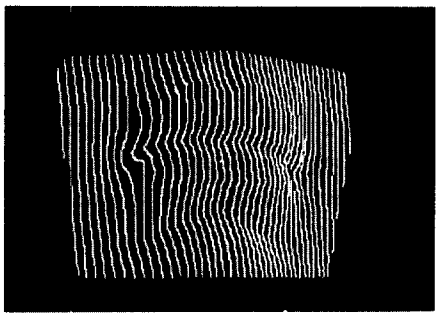
(e)



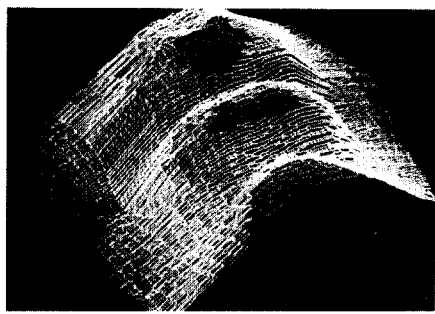
(b)



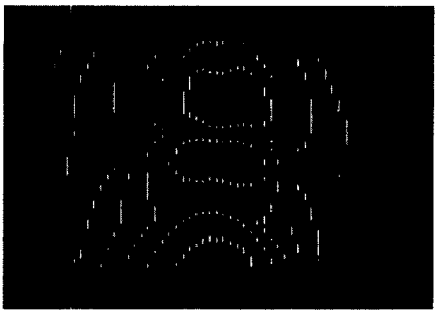
(f)



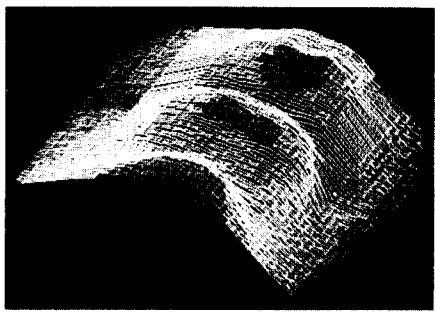
(c)



(g)



(d)



(h)

그림 7 일련의 영상처리과정

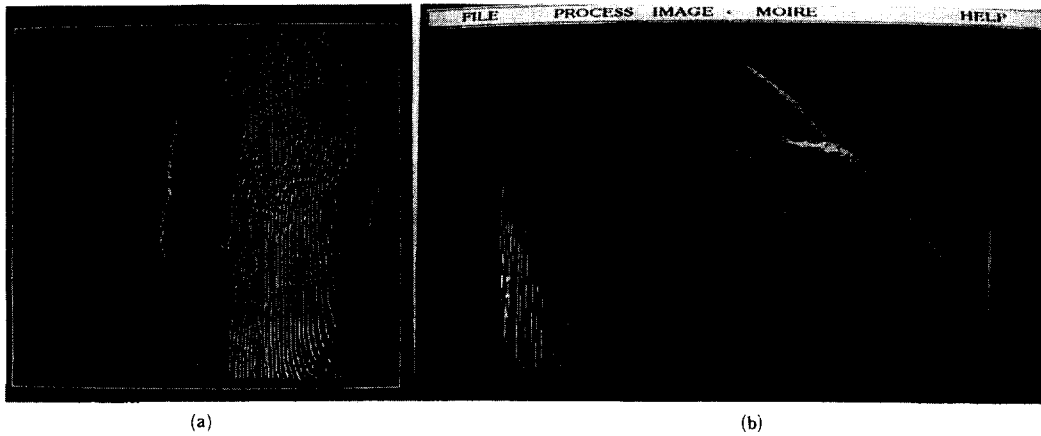


그림 8 아그리파상의 재현된 얼굴 형상

림 7(f)에서 보는 바와 같이 번호가 매겨진 변형격자의 모든 점에서 모아레차수를 구할 수 있다. 그림 7(g)와 (h)는 이러한 방법에 의하여 측정된 결과를 3차원으로 보여주는 그림으로 사람얼굴의 입술부분의 형상이다.

그림 8은 주사식 모아레토포그라피를 이용하여 아그리파상의 3차원형상을 측정한 결과를 보여주는 그림으로 그림 8(a)는 슬릿빔 프로브를 이동하면서 얻은 변형격자이고 그림 8(b)는 변형격자를 영상처리기법을 이용하여 컴퓨터 내에서 모아레무늬를 형성시켜 해석하여 재현한 아그리파상의 3차원형상이다.

4. 모아레현상을 이용한 가공정도 검사

가공하고자 하는 형상을 알고 있는 물품에 대하여 가공정도를 검사하기 위한 방법을 소개한다. 우선 기존의 모아레토포그라피에서 모아레무늬를 형성하기 위하여 사용하는 일정한 간격을 갖는 직선군이 아닌 검사하고자 하는 물체의 형상에 따른 무늬를 형상데이터로부터 컴퓨터 내에서 얻는다. 그리고 가공된 물체에 격자무늬를 투영시키고 카메라에 의해 변형격자를 저장한 후 두 무늬를 겹치면 만일 동일한 기하학적 조건하에서 두 무늬가 형성되었다면 가공에러가 존재할 경우 모아레무늬가 형성된

다. 이 모아레무늬를 해석함으로써 정량적인 가공에러를 산출할 수 있다. 품질검사에 응용하기 위한 두 가지 방법은 다음과 같다.

(1) 컴퓨터에 의해 형성된 무늬와 직선으로 이루어진 기준격자와 간섭을 일으켜 모아레무늬를 얻고 실제 가공된 물체의 표면형상에 따른 변형격자와 기준격자 사이에서 모아레무늬를 얻어, 이 두 모아레무늬를 비교하여 가공에러를 산출한다.

(2) 2.4절에서 다른 방법을 사용하여 모아레무늬가 등고선이고 인접한 모아레무늬 사이 간격이 동일하도록 모아레패턴을 영상처리기법을 이용하여 만들고 실제로 형성된 모아레무늬를 비교하여 가공에러를 산출한다.

5. 맺음말

모아레토포그라피를 이용한 금형제작을 위한 클레이모형 (clay model)의 3차원 형상측정을 위한 방법이 제시되었다. 그리고 모아레무늬를 해석하는 방법이 제시되어 클레이모형의 형상을 측정하였고 디지털영상처리기법을 사용하는 일련의 과정을 통해 3차원 형상을 재현하였다. IBM PC/386과 CCD 카메라를 사용하여 실험한 결과 0.05mm의 분해능을 가지며 측정속도가 5분 가량이 소요되었다. 따라서 광학적방법

이 접촉식 디지털이징을 이용하였을 경우 발생하는 많은 문제점 등을 효율적으로 보완할 수 있다. 그리고 품질검사를 자동화할 수 있는 방법을 제시하였고 기존의 모아레토포그래피가 가지는 어려움을 극복하기 위하여 새로운 방법인 주사식 모아레토포그래피를 제시하였다.

참고문헌

- (1) Takasaki, H., 1980, "Moire Topography," Appl. Opt., p. 1467.
- (2) Meadow, D.M., Johnson, W.O. and Allen, J.B., 1973, "Generation of Surface Contours by Moire Patterns," Appl. Opt., p. 845.
- (3) Takasaki, H., "Moire Topography," Appl. Opt., p. 845.
- (4) Pirodda, L., 1982, "Shadow and Projection Moire Techniques for Absolute or Relative Mapping of Surface Shapes," Opt. Eng., p. 640.
- (5) Reid, G.T., Rixon, R.C., Marshall, S.J. and Stewart, H., 1986, "Absolute On-Line Measurement of Three Dimensional Shape by Shadow Casting Moire Topography," Wear, p. 297.
- (6) Idesawa, M., Yatagai, T. and Soma T. 1977, "Scanning Moire Method and Automatic Measurement of 3-D Shapes," Appl. Opt., p. 2152.
- (7) Duncan, J.P., Mair S.G., "Sculpture Surfaces in Engineering and Medicine," 1983, Cambridge University Press.
- (8) Lim, J.S., 1989, "Order Determination and Visuality Enhancement of Moire Topographic Fringes," KAIST, Ph.D. Dissertation.
- (9) Park, H.G., Kim, S.W., "Three Dimensional Measurement of Surface Profiles of Dies and Models Using Moire Topography (I)."
- (10) Joo, S.J., 1990, "Three Dimensional Geometric Data Acquisition and Surface Reconstruction Using a Structured Light System," KAIST, M.S.Thesis.
- (11) Kim, S.W. and Park, H.G., 1991, "Three Dimensional Profile Measurement by Using Moire Topography," CIRP. 