

치의학을 위한 이중노출
홀로그래피 간섭기법 연구

0 * ** *** *
길상근, 강홍석, 최평석, 박한규

* 연세대학교 전자공학과 ** 연세대학교 치의학과 *** 창원대학교 전자공학과

A Study on the Double Exposure Holographic Interferometry
for Dental Science

0 * ** *** *
S.K.Gil, H.S.Kang, P.S.Choi, H.K.Park

* Dept. of Electronic Eng. Yonsei Univ.
** Dept. of Dental Science Yonsei Univ.
*** Dept. of Electronic Eng. Changwon Univ.

ABSTRACT

Holographic interferometry is applied in dental research to study the motion of teeth and the deformation of the associated facial structure. We consider double exposure holographic interferometry which has limiting factors such as the stability of fringes, the recording time, the amount of exposure, the localization of fringes and sensitivity. These factors are taken into account to make interferogram. The resulting interferogram gives fringe pattern which is analyzed qualitatively to determine the relative rotation and the deformation of the facial structure.

1. 서론

1960년대에 holography 가 interferometry 에 응용된 이후로⁽¹⁾⁽²⁾ holographic interferometry 는 물체 표면의 정적(static) 또는 동적(dynamic)인 변형 및 변위를 분석 측정할 수 있는 가장 중요한 기술이 되었다. 이는 다양한 물질의 변형 측정에 적용할 수 있으며, 고감도의 측정과 비파괴 측정을 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 1970년대에 들어서 holography는 치아의 이동이나 두개안면골의 변형 측정에 응용되기 시작하였고,⁽³⁾ 1980년대에 들어서는 holography 를 이용하여 치아이동시 Center of Resistance 나 Center of Rotation 을 찾기위한 시도로 응용되었다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

본 논문에서는 이중노출 홀로그래피 간섭기법을 이용하여 interferogram 생성시 중요한 요소가 되는

간섭무늬 안정도, 기록시간, 노출량, 간섭무늬 이동 및 변위방향에 대한 민감도에 대하여 고찰하였고, 실제 굴격구조를 갖는 인간 두개골을 대상으로 상악골 전방견인시 악안면골에 일어나는 초기반응에 관하여 연구하였다.

2. 이중노출 홀로그래피 간섭

이중노출 홀로그래피 간섭기법은 대상물체에 힘을 주지않은 초기상태에서 우선 물체광과 기준광을 동시에 photographic plate 에 노출시킨 다음, 대상물체에 힘을 준 이후 동일 plate 상에 물체광과 기준광을 노출시키면 변형전 후의 물체광이 공간적 간섭(spatial interference) 을 일으켜 대상물체에 간섭무늬(fringe)가 나타나는 기법이다. 이때 간섭무늬의 방향과 간격은 대상물체의 변형(deformation), 변위(displacement), 회전(rotation) 등을 지시해주는 정보를 포함한다.

만약 변형을 가하기전의 대상물체에 의해서 산란되는 빛을 $U_0(x,y)$ 라 하고, 변형을 가한후의 산란되는 빛을 $U_0'(x,y)$ 라하면

$$U_0(x,y) = a(x,y)\exp[-j\phi(x,y)] \quad (1)$$

$$U_0'(x,y) = a(x,y)\exp[-j\phi(x,y) + \Delta\phi(x,y)] \quad (2)$$

이고, 이때 재생광의 빛의 세기는

$$I(x,y) = \left[a(x,y)\exp[-j\phi(x,y)] + a(x,y)\{-j\phi(x,y) + \Delta\phi(x,y)\} \right]^2 \\ = 2a^2(x,y)\{1 + \cos[\Delta\phi(x,y)]\} \quad (3)$$

이다. 이것은 빛의 세기, $a^2(x,y)$, 가 간섭무늬 패턴 $2\{1 + \cos[\Delta\phi(x,y)]\}$ 에 의해서 변조됨을 나타낸다.

여기서 $\Delta\beta(x,y)$ 는 두 노출사이에서 대상물체 위치의 변화에 기인한 광학적 위상차이다.

(그림 1)은 간섭무늬 해석을 위한 도식적 그림이다.

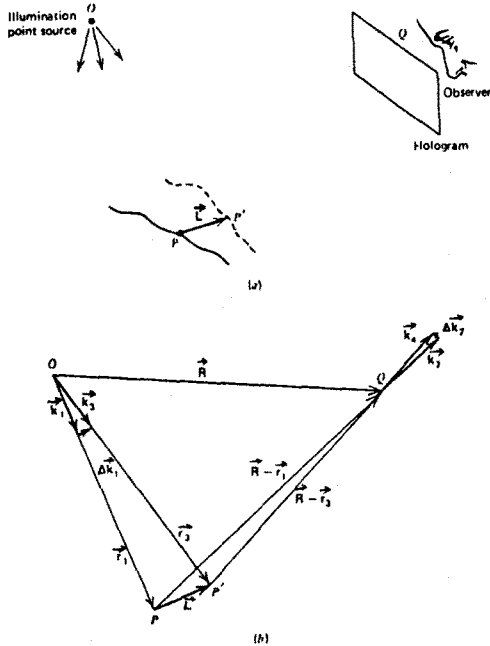


그림 1. Nomenclature for fringe analysis
(a) Schematic diagram of the system
(b) Position and propagation vectors

이중노출 홀로그램이 기록되어지고 양 노출간 P점이 L 만큼 변위되었다. 여기서 β_1 을 변위되기전의 P점에 의해 산란된 빛의 위상이라 하고, β_2 를 변위가 일어난 후의 위상이라 하면

$$\beta_1 = \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \vec{k}_2 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_1) + \beta_r \quad (4)$$

$$\beta_2 = \vec{k}_3 \cdot \vec{r}_3 + \vec{k}_4 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_3) + \beta_r \quad (5)$$

(k_1, k_2, k_3, k_4 : propagation vectors of light
 β_r : arbitrary phase

이다. 이때 δ 를 $\Delta\beta(x,y)$ 대신에 사용하면, 관측자에 의해서 측정되는 위상차는

$$\delta = \beta_2 - \beta_1 = (\vec{k}_3 - \vec{k}_1) \cdot (\vec{r}_3 - \vec{r}_1) + \Delta\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_3 + \Delta\vec{k}_2 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_3) \quad (6)$$

이다. 여기서 $r_1 \gg L = |\vec{r}_3 - \vec{r}_1|$, $r_3 \gg L$ 이므로

$$\delta = (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{L} \quad (7)$$

인 관계를 갖는다. (7)식으로부터 sensitivity vector \vec{K} 를 정의하면

$$\vec{K} = \vec{k}_2 - \vec{k}_1 \quad (8)$$

이고

$$\delta = \vec{K} \cdot \vec{L} \quad (9)$$

이 된다. 만약 변위가 rigid body translation과 rotation 을 동시에 포함한다면 sensitivity vector \vec{K} 는 이러한 변위량을 측정하는데 아주 중요한 파라메타가 된다.

(그림 2)는 Coplanar displacement를 나타낸 것으로 sensitivity vector와 변위와의 관계를 나타낸다.

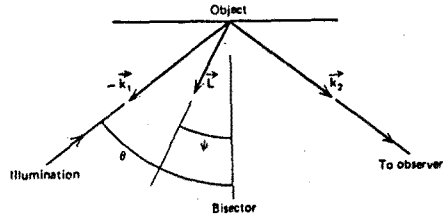


그림 2. Coplanar displacement

기준광과 관측 방향사이의 각도를 2θ 라 하면, (식 8)으로 부터

$$\delta = 2 \cdot K \cdot L \cdot \cos\theta \cdot \cos\psi \quad (10)$$

이다. 즉 실험장치의 구성에 따라 sensitivity vector 방향은 달라지며, 본 연구에서는 (그림 2)와 같이 방향을 설정하여 δ 가 translation보다는 rotation에 민감하도록 하였다.

이중노출 홀로그램에 의해 관측된 간섭무늬는 공간상으로 대상물체의 표면으로부터 앞 또는 뒤에 위치할 수 있다. 이러한 현상을 'fringe localization' 이라 부르고 이는 holographic system 의 기하학적 구성과 물체 표면의 변위 벡터에 기인한다. 일반적으로 holographic interferometry 의 간섭무늬는 공간상의 어떤 곡면 상에 위치하며, 주어진 관측방향에 대하여 간섭무늬의 선명도(visibility) 가 최대가 되는 점에 위치한다. 그러나 이러한 fringe localization 은 관측 시스템의 aperture 크기에 의존한다. 만약 홀로그램 영상을 사진 찍을 때, 큰 aperture 를 가진 camera 로 물체 표면에 초점을 맞춰 사진 찍으면 간섭무늬의 선명도는 명확하지 않지만 작은 aperture 를 가진 camera 로 사진을 찍으면 선명한 간섭무늬가 물체 표면 상에 위치하게 된다.

본 연구에서는 CCD-camera 를 사용하여 monitor 상에 홀로그램 영상과 간섭무늬를 관측하였고, monitor 상에 나타난 영상을 다시 사진 촬영하였다.

3. 실험 및 결과고찰

본 연구에서는 성인 견조 두개골을 사용하였고, 상악 전방 견인시 치아를 통한 정형력이 상악골 전체에 효과적으로 전달되게 하기 위하여 상악 치아를 하나의 unit으로 고정시켜 주는 구내고정장치(intraoral anchorage)를 사용 하였다.(그림 3)

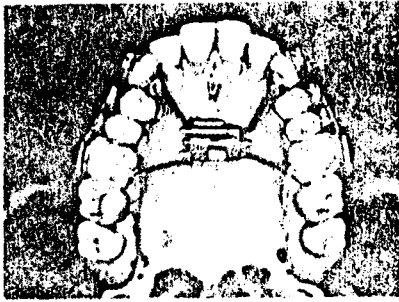


그림 3. Intraoral anchorage unit

또한 (그림 3)과 같이 장치한 두개골은 무겁고 단단한 금속고정장치에 고정시켰다.(그림 4)

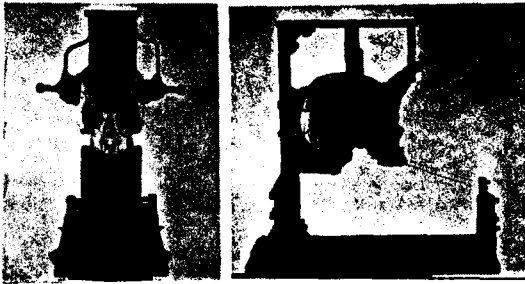


그림 4. Fixed skull unit

이렇게 두개골을 고정한 장치는 (그림 5)와 같이 holographic interferometry 를 구성하여 변형 전 후의 이중노출 홀로그래프를 얻었다.

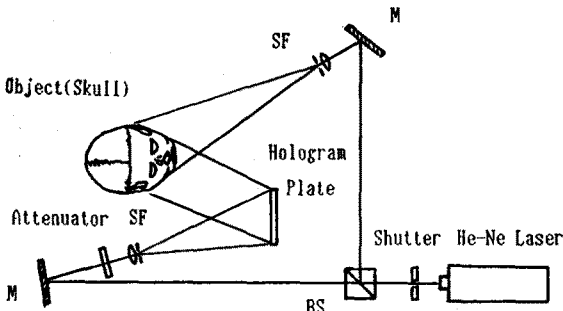


그림 5. Holographic interferometry set up

먼저 실험 테이블과 optical components 그리고 피축정 두개골 고정장치의 안정도(stability)를 측정하기 위하여 변형없이 이중노출을 실시하였고 이때 간섭무늬가 나타나지 않는 것으로 신뢰도(reliability)를 측정하였다.

전방 견인은 양측 견치의 양측 제1대구치에서 각각 시행하였다. 두개골 위에서 볼 때 sagittal plane 과 평행하게 견인하였으며 측면에서 볼 때 교합면에 대하여 평행, 하방 10°, 하방 20°로 견인하였다. 하중장치로는 dead weight type 으로 견인력을 주었으며 견인력은 양측에 각각 100g, 300g, 500g 으로하였다. 홀로그래피 촬영은 20mW He-Ne laser (NEC CLG 5700) 를 사용하여 두개골의 정면과 우측면을 촬영하였고, 홀로그램 필름으로는 Agfa 8E75 plate 를 사용하였다. 이때 물체광의 세기는 30mW, 기준광의 세기는 600 mW 로 하였으며 노출시간은 각각 4 초씩하였다.

노출은 견인력을 주지않은 상태에서 1차 감광시키고 5 분간 견인력을 치아에 가한 후에 동일 plate 에 이중노출로 감광시켰다. 감광된 필름은 현상, 정착, 표백과정을 거쳐 위상형 홀로그래프를 얻었다.

이렇게하여 얻은 홀로그래프에 재생광을 조사하고 CCD-camera 를 사용하여 monitor 상에 홀로그래프 영상과 간섭무늬를 관측하였고 간섭무늬의 방향과 간격을 비교하여 상악골의 변위를 비교 분석하였다.

(사진 1)과 (사진 2)는 제1대구치와 견치를 각각 견인하였을 때의 monitor에 나타난 홀로그래피 영상 및 간섭무늬를 나타낸 것이다.

실험결과, 교합면과 평행하게 견인하는 경우보다 교합면 하방 각도를 갖을수록 상악골의 전상방 회전양상이 적었고, 견치에서 교합면 하방 20°로 견인시 가장 적은 전상방 회전을 보였다.

4. 결론

이중노출 간섭기법을 이용한 치의학의 응용이 실제 골격구조를 갖는 인간 두개골을 대상으로 실험할 수 있으며 작은 변형도 가지적으로 또한 입체적 연속적으로 관찰 및 분석이 가능함을 확인하였다. 이는 악의 정형력으로 부정교합의 치료를 가능케 해준다. 앞으로 3-차원의 정량적인 간섭무늬 해석이 수행되면 좀 더 정확한 해석과 치료가 가능 하리라 사료된다.

참고 문헌

1. M.H.Horaan, An Application of Wavefront Reconstruction to Interferometry, Appl. Opt., 4, p333-336, 1965
2. R.L. Powell & K.A.Stetson, Interferometric Analysis by Wavefront Reconstruction, J.Opt.Soc.Am., 55, p1593-1965, 1965
3. R.Christiansen & C.J.Burstone, Centers of Rotation within the Periodontal Space, Am.J.Orthod., 55, p353-369, 1969
4. C.J.Burstone, T.W. Every & R.J.Pryputniewicz, Holographic Measurement of Incisor Extrusion, Am.J.Orthod., 82, p1-9, 1982
5. L.R.Dermout, Experimental Determination of the Center of Resistance of the Upper First Molar in a Macerated Dry Human Skull Submitted to Horizontal Head Gear Traction, Am.J.Orthod., 90, p29-36, 1986
6. G.Kragt, H.S.Duterloo & J.J.Borsch, The Initial Reaction of a Macerated Skull Caused by Orthodontic Cervical Traction Determined by Laser Metrology, Am.J.Orthod., 81, p49-56, 1982



사진 1. 제 1 대구치를 하방 20° 견인시 (견인력: 위로부터 100g, 300g, 500g) 정면 및 우측면의 홀로그래피 영상과 간섭무늬



사진 2. 견치를 평행, 하방 10°, 하방 20° 각각 견인시 (견인력: 100g) 우측면의 홀로그래피 영상과 간섭무늬