

투과식뉴턴간섭무늬의 대조도에 대한 연구

한 용 하

위대한 수령 김일성동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《주체화를 실현하여야 인민경제를 자주적으로, 창조적으로 발전시킬수 있습니다.》

(《김일성전집》 제68권 93페이지)

최근에 흰빛조명을 리용하여 얻은 간섭무늬에 대한 응용연구가 활발히 벌어지고있다.[1-3] 분광기가 뒤에 놓이는 다중빛묶음간섭계를 조명하여 얻어지는 무늬들은 등색차수간섭무늬(FECO)라고 한다. FECO는 반사때 두께, 굴절률, 광학적위상변화를 측정하는데 리용된다.[4, 5] 한편 선행연구[6, 7]에서는 공기름이 있는 은증착렌즈-평판간섭계에서 FECO의 형성을 연구하고 이 무늬들을 리용하여 렌즈의 곡률반경과 렌즈표면의 형태를 측정하였다. 또한 선행연구[8]에서는 액체름이 있는 은증착렌즈-평판간섭계에서 투과형FECO의 형성을 연구하였다. 그러나 증착된 렌즈면과 평면판의 반사결수들이 투과형간섭무늬의 대조도에 주는 영향은 연구하지 못하였다.

우리는 투과 및 반사형의 다중빛묶음흰빛간섭무늬들의 간단한 광학적모의를 진행하고 얻어진 간섭무늬들의 모양과 특성을 분석하였으며 얻어진 간섭무늬들의 대조도와 증착된 렌즈표면과 평면판의 반사결수사이의 관계를 연구하였다.

1. 이론적연구

파동의 세기는 각각 I_1 , I_2 이고 진동수가 같은 2개의 단색빛파동들사이의 간섭을 연구하자. 간섭하는 단색빛들은 중첩되면서 단색간섭무늬를 형성한다. 이때 두 파동의 세기가 같다면 즉 $I_1 = I_2$ 이면 합성빛파동의 세기분포 I 는 다음과 같다.

$$I = 4I_1 \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) = I_0 \cos^2\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \quad (1)$$

여기서 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 는 개별적인 파동들사이의 위상차이고 $I_0 = 4I_1$ 이다.

합성빛파동세기의 극대들은 위상차가 π 의 짝수배인 때 생기며 극소들은 위상차가 π 의 홀수배인때 생긴다. 식 (1)로부터 간섭무늬의 세기분포는 위상차의 코시누스값에 따라 주기적으로 변한다는것을 알수 있다.

합성빛파동의 세기는 빛파동세기의 극대($I_{\text{최대}}$)와 극소($I_{\text{최소}}$)사이의 값들을 가진다.

$$\begin{aligned} I_{\text{최대}} &= I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \\ I_{\text{최소}} &= I_1 + I_2 - 2(I_1 I_2)^{1/2} \end{aligned} \quad (2)$$

한편 개별적인 파동들의 복소수진폭이 주어진 경우 간섭무늬들의 대조도는 다음과 같다.

$$\gamma = 2(I_1 I_2)^{1/2} / (I_1 + I_2) \quad (3)$$

뉴턴무늬를 연구하기 위한 광학계구성도는 그림 1과 같다.

그림 1로부터 뉴턴무늬들은 투과형과 반사형으로 얻어질수 있다.

먼저 투과형뉴턴무늬를 연구하자.

그림 1과 같이 곡률반경이 큰 구면을 평면 유리판우에 놓고 빛을 위에서 수직으로 입사시킨다. 이때 직접투과된 빛선 L_{t1} 과 표면들에서 반사된 빛선 L_{t2} 가 있게 되며 이 두 빛선은 같은 빛이 부분반사에 의하여 갈라진것이므로 간섭할수 있다.

이때 두 빛선의 행로차는 공기름의 두께 Δh 의 2배와 같다. 표면 B_1 의 곡률반경이 R 이고 접촉점으로부터의 거리를 r 라고 하면 두 빛선사이의 행로차는 다음과 같다.

$$\Delta\delta = 2\Delta h = \frac{r^2 + (\Delta h)^2}{R} \approx \frac{r^2}{R} \quad (4)$$

따라서 식 (2)로부터 투과형 뉴턴간섭무늬의 세기분포는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$I(r) = I_0 \cos^2[\pi n r^2 / (\lambda R)] \quad (5)$$

식 (5)를 리용하여 MATLAB로 투과형 뉴턴간섭무늬의 3차원세기분포를 계산하면 그림 2의 ㄱ)와 같다.

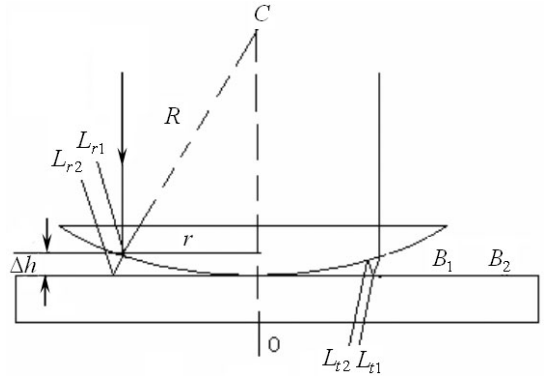


그림 1. 뉴턴무늬형성의 광학계

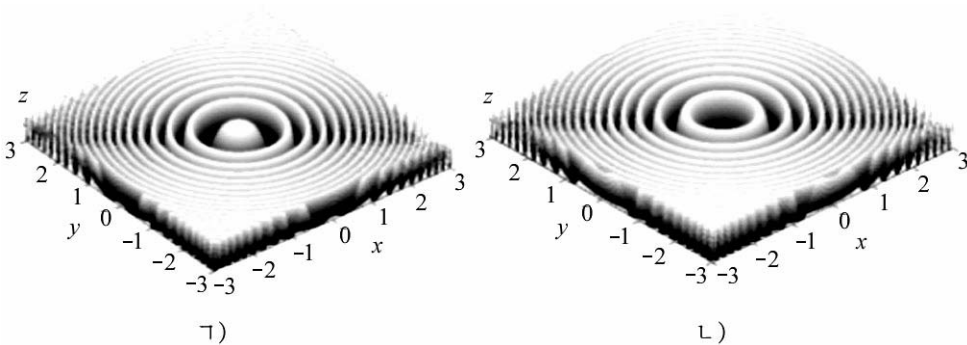


그림 2. 투과형간섭무늬의 3차원세기분포

ㄱ) 투과, ㄴ) 반사

그림 2의 ㄱ)에서 보는바와 같이 Δh 가 같은 점들의 자리길은 중심이 $r=0$ 에 있는 원이며 빛선 L_{t2} 에 대해서는 반사될 때 π 의 위상변화가 두번 존재하고 빛선 L_{t1} 에 대해서는 위상변화가 존재하지 않는다. 따라서 투과형간섭무늬의 중심(령차무늬)은 밝으며 밝고 어두운 고리무늬들이 관측되게 된다.

다음으로 반사형간섭무늬를 연구하자.

이 경우 간섭무늬는 평면판으로부터 반사된 빛선 L_{r2} 와 렌즈의 곡면으로부터 반사된 빛선 L_{r1} 의 간섭으로 얻어진다. 빛선 L_{r2} 는 굴절률이 보다 큰 매질로부터 반사되므로 반사

때 π 만 한 위상변화를 일으키며 빛선 L_{r1} 은 보다 작은 굴절률의 매질로부터 반사되므로 위상변화를 일으키지 않는다.

따라서 간섭무늬의 세기분포는 다음과 같이 된다.

$$I(r) = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi r^2}{\lambda R} - \frac{\pi}{2} \right) = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi r^2}{\lambda R} \right) \quad (6)$$

식 (6)을 리용하여 MATLAB로 반사형뉴턴간섭무늬의 3차원세기분포를 계산하면 그림 2의 ㄴ)와 같다.

그림 2의 ㄴ)에서 보는바와 같이 접촉점에서는 위상차가 없기때문에 무늬의 중심은 어둡고 총 위상변화는 반사할 때 받는 π 의 위상변화뿐이며 역시 밝고 어두운 고리무늬들이 관측된다. 다시말하여 반사형간섭무늬들은 투과형간섭무늬들과 보상관계에 있다.

다음 반사형뉴턴간섭무늬의 대조도를 계산하자.

입사빛의 세기를 I_i , 렌즈와 평면판의 표면들의 반사계수를 R 라고 하자.

그러면 그림 1에서 렌즈의 구면으로부터 반사된 빛선 L_{r1} 의 세기는 $I_i(1-R)R$ 이고 빛선 L_{r2} 의 세기는 $I_i(1-R)^4R$ 이다. 광학유리의 반사계수가 0.04이므로 $I_i=100$ 이라고 가정하면 빛선 L_{r1} , L_{r2} 의 상대세기는 각각 3.6, 2.8이며 식 (3)으로부터 간섭무늬의 대조도는 약 0.99이다.

반사형간섭무늬에서 두 빛선에 해당하는 진폭들은 거의 같은 값을 가지기때문에 간섭무늬들의 극소들은 거의 령에 가까우며 무늬들의 보임도는 매우 좋다. 그러므로 많은 경우에 간섭측정학에서는 반사형간섭무늬를 리용한다.

또한 투과형간섭무늬의 대조도를 계산하자.

입사빛의 세기를 I_i , 렌즈의 옷면과 표준평면판아래면의 반사계수를 각각 R , 렌즈의 아래면과 표준평면판윗면의 반사계수를 각각 R_c 라고 하자.

그러면 그림 1에서 투과빛선 L_{t1} 과 L_{t2} 의 세기들은 각각 $I_i(1-R)^2(1-R_c)^2$ 와 $I_i(1-R)^2(1-R_c)^2R_c^2$ 로 된다.

따라서 $R=R_c=0.04$ 인 일반적인 경우에 $I_i=100$ 이라면 빛선 L_{t1} , L_{t2} 들의 상대세기는 각각 0.86, 0.14이며 식 (3)으로부터 간섭무늬의 대조도는 약 0.0747이다.

그러나 일반적으로 뉴턴간섭계에서 투과형간섭무늬는 볼수 없다.

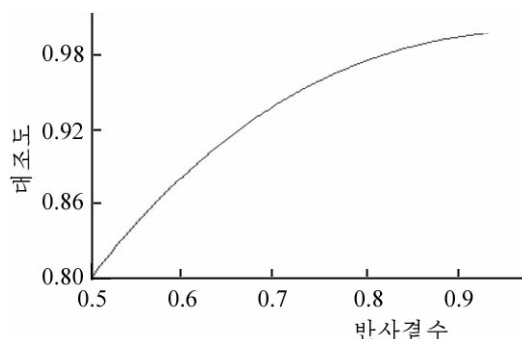


그림 3. 증착면들의 반사계수에 따르는 간섭무늬의 대조도변화

렌즈의 구면과 표준평면판윗면의 반사계수를 크게 하면 투과형간섭무늬의 대조도를 크게 높일 수 있다. 반사계수의 증가는 적당한 금속을 이 표면들에 증착시켜 얻을수 있다.

렌즈의 구면과 표준평면판윗면의 반사계수를 변화시키면서 간섭무늬의 대조도를 계산한 결과는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 투과형간섭무늬의 대조도는 거의 1까지 임의로 조절할수 있으며 보임도가 대단히 좋은 간섭무늬들을 얻을수 있다는것을 알수 있다.

2. 투과형간섭계의 특성

우리는 표준평면판과 렌즈의 구면을 크롭으로 증착하였다.

간섭계를 파장이 650nm인 반도체레이자로 조명할 때 크롭증착시킨 렌즈와 평면판으로 구성된 투과형뉴턴간섭계로부터 얻어진 간섭무늬는 그림 4와 같다.

이때 증착시킨 면들의 반사결수는 각각 0.85이고 렌즈의 곡률반경은 $R=1\,515.8\text{mm}$ 이며 얻어지는 간섭무늬의 대조도는 0.99이다.

흰빛으로 조명할 때 크롭증착시킨 렌즈와 평면판으로 구성된 투과형뉴턴간섭계로부터 얻어진 간섭무늬는 그림 5와 같다.

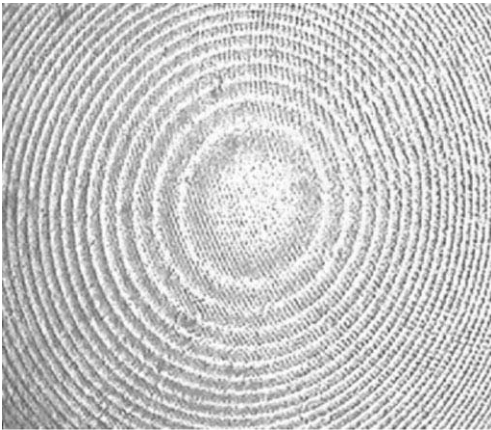


그림 4. 투과형단색빛묶음간섭무늬

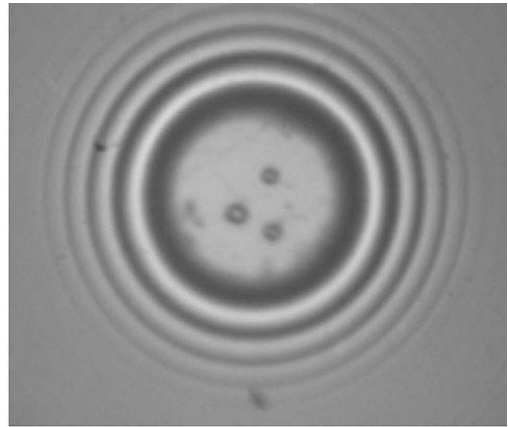


그림 5. 투과형다중빛묶음흰빛간섭무늬

그림 5에서 보는바와 같이 흰빛조명때 간섭무늬들은 간섭하는 빛의 행로들이 정합될 때만 얻어진다. 이것은 다음과 같이 설명할수 있다.

흰빛원천의 간섭성길이는 짧다. 그러므로 간섭계를 흰빛으로 조명할 때 얻어지는 간섭무늬는 매우 낮은 간섭차수에 대해서만 볼수 있다.

고차무늬들은 중첩되며 간섭무늬들은 없어진다.

이것은 흰빛조명의 매 단색성분들이 특정한 무늬간격과 배치방향을 가지는 자체의 간섭무늬들을 형성하기때문이다. 그러면 간섭계의 출구면에는 원천의 모든 단색성분들에 대한 비간섭중첩이 있게 되기때문이다.

맺는 말

1) 투과형뉴턴간섭계에서 형성된 간섭무늬의 특성을 보여주는 간단한 모의방법을 연구하고 투과형간섭무늬의 대조도를 해석하는 간단한 방법을 제안한다.

2) 크롭증착시킨 렌즈와 평면판으로 이루어진 뉴턴간섭계를 제작하고 투과형다중빛묶음흰빛뉴턴무늬들을 실험적으로 얻었다. 얻어지는 간섭무늬의 대조도는 0.99이다.

참 고 문 헌

- [1] J. Schwider; Appl. Opt., **36**, 1433, 1997.
- [2] R. T. Sandeman; Appl. Opt., **10**, 1087, 1971.
- [3] J. M. Bennett; Appl. Opt., **15**, 2705, 1976.
- [4] S. Y. El-Zaiat; Opt. Laser Technol., **34**, 55, 2003.
- [5] R. Tadmor et al.; J. Colloid Interface Sci., **264**, 548, 2003.
- [6] W. H. Briscoe et al.; J. Opt., A **6**, 112, 2004.
- [7] Wee Keat Chong et al.; Optics and Laser in EGINEERING, **51**, 651, 2013.
- [8] Meng-Cheng Li et al.; Appl. Opt., **51**, 36, 8579, 2012.

주체104(2015)년 8월 4일 원고접수

On Contrast of Newton's Interference Fringes in Transmission

Han Yong Ha

A simple simulation method describing the characteristic of the formed interference fringes in the multiple-beam white-light Newton's interferometer in transmission is considered.

The Newton's interferometer of the chrom coated lens-plate combination is manufactured and the multiple-beam white-light Newton's fringes in transmission are produced experimentally in the Newton's interferometer.

Key words: Newton's interferometer, transmission