

준열광원의 결맞음시간 측정

김현오 · 하 양 · 신종태 · 김태수

울산대학교 물리학과

(1996년 2월 24일 받음)

He-Ne 레이저를 표면이 9 μm의 거칠기로 연마된 원형유리에 투과시킨 준열광원을 제작하여, 측정시간 T 와 회전속도 v 등의 실험조건을 변화시키면서 광전자 분포의 변화를 측정하였다. 준열광원에서 나오는 빛의 광전자 분포의 평균값 $\langle n \rangle$ 과 가변도 $\langle (\Delta n)^2 \rangle$ 를 구해본 결과, 측정시간 T 가 결맞음시간 τ_c 에 비해서 클 때는 광전자 분포가 푸아송 분포로 접근한다는 것을 확인하였다.

T 가 τ_c 보다 훨씬 큰 즉, $T/\tau_c \gg 1$ 인 경우 연마유리 원판의 회전속도를 변화시키면서 광전자 분포를 측정함으로써 회전속도가 증가함에 따라 결맞음시간 τ_c 가 31.43 μs에서 2.48 μs로 감소한다는 것을 확인하였으며, 표면의 거칠기 σ 와 회전속도 v 의 비로 나타내는 결맞음시간 σ/v 와 비교하였다.

I. 서 론

일상생활에서 접하는 조명등이나 자연광은 대부분 많은 원자들이 독자적으로 빛을 방출하는 광원이다. 각 원자들은 빠른 속도로 움직이거나 충돌에 의해서 진동수가 다르기 때문에 전체적으로는 선편을 갖게 됨으로써 빛의 세기가 요동하게 되는 요인이 된다. 이러한 무질서한 광을 열광원이라 부른다. 열광원은 그 선편이 대단히 커서 선편의 역수인 결맞음시간 τ_c 는 일반적으로 10^{-12} s 이하이고, 특별히 긴 경우가 10^{-9} s 정도이다.

열광원은 결맞음시간에 대응되는 결맞음길이는 수 mm 이내이고, 길어야 수 10 cm를 넘지 않으므로 실험실에서 Michelson 간섭계 등으로 측정이 가능하다. 그러나 결맞음시간이 10^{-6} s 즉, 1 μs 이상이 된다면 결맞음길이가 수십 m 이상이 되므로 실험실에서 측정한다는 것은 불가능하며, 측정하기 위해서는 Hanbury-Brown과 Twiss의 실험에서와 같이 시간차 세기상관을 구해야 가능해진다.^[1]

본 논문에서는 이러한 Michelson 간섭계로 측정이 어려운 시간영역에서의 결맞음시간을 광전자 분포 측정을 통해 구하였다. 보통 열광원은 Doppler 효과에 의한 Gauss형 비균질 선편확대와 원자간의 상호작용에 의한 Lorentz형 균질확대의 두가지가 있으며, 본 논문에서는 후자의 방식으로 선편확대가 이루어지는 경우를 택하였다. 이를위해 He-Ne 레이저를 회전 가능한 원형 연마유리에 투과시켰으며, 회전하는 연마유리를 통과한

빛은 거친 표면 때문에 위상이 무질서하게 변하므로 충돌효과에 의한 위상의 무질서한 변화와 동일한 효과를 얻을 수 있다. 이러한 준열광원에서 방출된 선편광된 빛을 PMT에 입사시켜 광전자 분포를 측정함으로써 연마유리의 회전속도에 따른 결맞음시간을 측정하였으며, 널리 사용되고 있는 결맞음시간의 계산법 즉, 표면거칠기 σ 를 회전속도 v 로 나눈값과 비교하였다.^[2]

II. 이론

선편이 $\gamma (=1/\tau_c)$ 인 Lorentz형 진동수 분포를 가지는 무질서한 광(chaotic light)에 대한 규격화된 시간차 세기상관 즉, 2차 간섭함수는^[3,4]

$$g^{(2)}(\tau) = 1 + e^{-2\gamma|\tau|} \quad (1)$$

이다. 여기서 t_1 과 t_2 의 시간차 $|t_2 - t_1|$ 를 나타낸다. 측정시간 T 동안의 평균을 구하면

$$\begin{aligned} \langle g^{(2)}(\tau) \rangle - 1 &= \frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T \exp(-2\gamma|t_2 - t_1|) dt_1 dt_2 \\ &= \frac{1}{2\gamma^2 T^2} [e^{-2\gamma T} + 2\gamma T - 1] \end{aligned} \quad (2)$$

이다.

사이클 평균세기가 $\bar{I}(t)$ 인 광이 T 시간동안 광측정 장치에서의 평균세기를

$$\bar{I}(t, T) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^{t+T} \bar{I}(t') dt' \quad (3)$$

라고 할 때, T 시간동안 n 개의 광전자를 검출할 확률은

$$P_n(T) = \langle P_n(t, T) \rangle$$

$$= \left\langle \frac{[\zeta \bar{I}(t, T) T]^n}{n!} \exp[-\zeta \bar{I}(t, T) T] \right\rangle \quad (4)$$

로 주어진다. 여기서 $\langle \rangle$ 는 t 에 대한 평균을 나타내며, ζ 는 광검출기의 효율을 나타낸다. 위의 (4)식을 이용하면

$$\langle n \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n(T) = \langle \zeta \bar{I}(t, T) T \rangle$$

$$= \zeta \bar{I} T \quad (5)$$

$$\langle n^2 \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} n^2 P_n(T) = \langle \zeta \bar{I}(t, T) T \rangle + \langle [\zeta \bar{I}(t, T) T]^2 \rangle$$

$$= \langle n \rangle + \langle [\zeta \bar{I}(t, T) T]^2 \rangle \quad (6)$$

가 된다. 가변도(variance)는 (5), (6)식으로부터

$$\langle (\Delta n)^2 \rangle = \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2$$

$$= \langle n \rangle + \zeta^2 T^2 \langle \bar{I}(t, T)^2 \rangle - \bar{I}^2 \quad (7)$$

이 되므로, 식 (2)의 관계를 이용하면

$$\langle (\Delta n)^2 \rangle = \langle n \rangle + \frac{\langle n \rangle^2}{2\gamma^2 T^2} [e^{-2\gamma T} + 2\gamma T - 1] \quad (8)$$

이 되며, 측정시간 T 가 광의 결맞음시간 $\tau_c (= 1/\gamma)$ 보다 대단히 짧을 때는

$$\langle (\Delta n)^2 \rangle = \langle n \rangle + \langle n \rangle^2 \quad (9)$$

가 되며, T 가 τ_c 에 비해서 길 때는

$$\langle (\Delta n)^2 \rangle = \langle n \rangle + \frac{\langle n \rangle^2}{\gamma T} \quad (10)$$

다. 만약 γT 가 대단히 클 때에는

$$\langle (\Delta n)^2 \rangle = \langle n \rangle \quad (11)$$

가 되어 푸아송 분포가 된다.^[5,6]

III. 실험

안정되게 발진하는 레이저 빔을 회전하는 연마유리 원판에 투과시키면 가우스 형태의 특성을 가지는 열광원을 얻을 수 있는데, 이러한 형태의 광원은 Martienssen과 Spiller에 의해 최초로 소개되었으며, 이러한 광

원을 준열광원(quasi-thermal light)이라 부른다.^[7] 실험에서 사용된 He-Ne 레이저(Spectra-physics Model 120s) 빔은 선편광되어 있고, 6 mW의 출력을 가지며, 거울에서 직각으로 격인 후 렌즈를 통해 연마유리로 입사하게 된다. 렌즈는 한쪽 면이 평면이고 다른 면은 볼록한 볼록렌즈로서 2 cm의 초점거리를 가진다. 주문 제작한 연마유리는 직경이 10 cm이고 두께가 1 cm이며, 원판의 한쪽 면은 9 μ m의 거칠기로 연마되어 있다. 연마유리 원판의 중앙에 모터의 회전축의 크기에 맞도록 직경이 약 1 cm인 구멍을 내고, 회전축에 유리원판을 고정시켰다. 모터(Shinko-DC Servo motor)는 입력정격 20 V, 1.5 A에서 1000 rpm의 회전수를 가지며, 인가전압에 따라 회전수를 변화시킬 수 있다.

이렇게 제작된 준열광원은 세기 분포가 가우스 형태인 전형적인 열광원의 특성을 가지면서도 결맞음시간은 렌즈의 초점에 놓인 연마유리 원판의 회전속도에 따라 변하는 특성을 가진다.

$$\tau_c = \frac{\sigma}{v} \quad (12)$$

연마유리 원판의 회전속도는 식 (12)에서 나타낸 것과 같이 결맞음시간 τ_c 와 직접적인 관계가 있다. (12)식은 평균 9 μ m의 거칠기를 갖는 유리 표면의 입자크기(grain size) 때문에, 회전하는 유리원판을 투과한 빛은 위상이 변하게 되는데, 투과된 빛의 결맞음시간은 유리 표면의 입자크기와 그 부분의 회전속도의 비로 표현할 수 있다. 구동모터의 인가전압에 따른 회전속도를 오실로스코프로 관측한 결과 10 V 이상에서는 대체로 회전속도가 전압에 비례하며, 전압별 속도는 표 1과 같다. 연마유리의 중심에서 4 cm 떨어진 지점을 통과한 빛은 여러 장의 감쇠필터(Neutral Density Filter; ND Filter)에서 세기가 약화된 후 암막 속에 놓인 광증배관(Hamamatsu R-636)으로 입사된다. 실험장치의 전체적인 구조는 그림 1과 같다.

표 1. 모터의 인가전압에 따른 회전속도의 변화.

Input Voltage(V)	frequency (s ⁻¹)	$\omega (= 2\pi f)$ (s ⁻¹)	$v (= r\omega)$ (m/s)
2	1.026	6.45	0.26
5	3.226	20.27	0.81
10	6.873	43.18	1.73
15	10.526	66.14	2.65
20	14.286	89.76	3.59
25	17.391	109.27	4.37

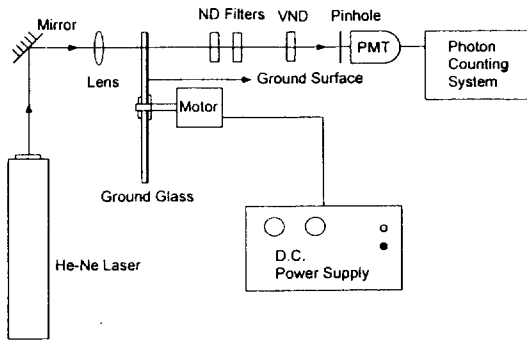


그림 1. Schematic Diagram of Experimental Set-up.

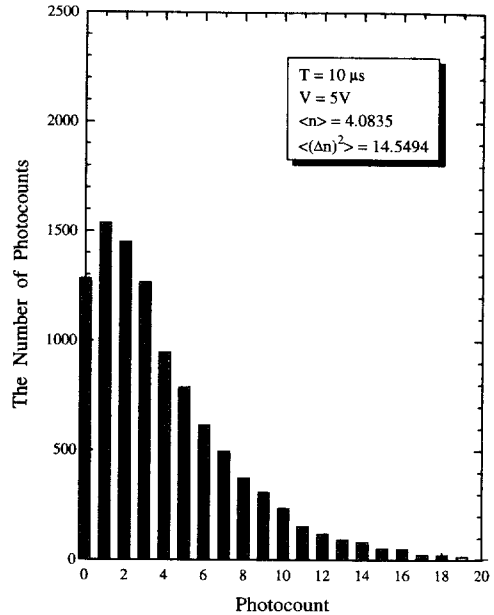


그림 3. 모터의 인가전압에 따른 광전자 분포.

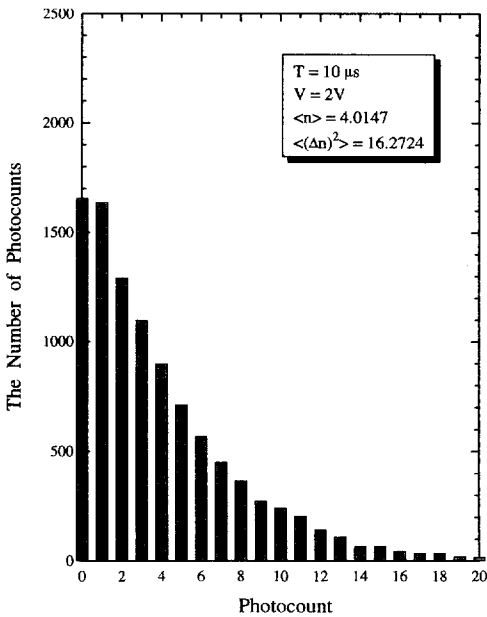


그림 2. 모터의 인가전압에 따른 광전자 분포.

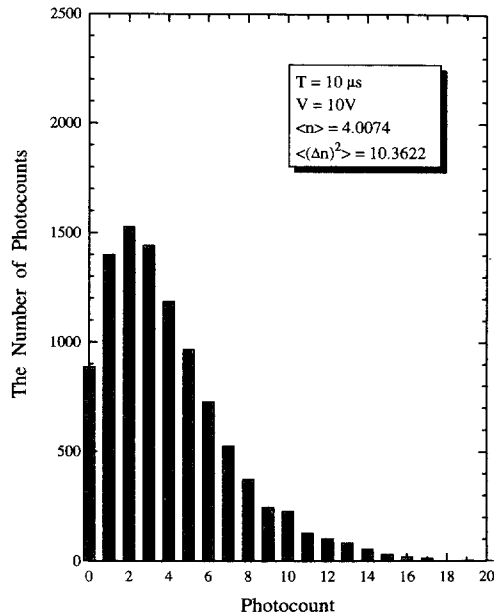


그림 4. 모터의 인가전압에 따른 광전자 분포.

- 1480 V의 전압이 인가된 PMT에 빛이 입사하게 되면 광전효과에 의해 광전자가 발생하게 되고 증폭된 후 다시 증폭기(Amplifier; LeCroy 612AM)를 거치면서 40 배로 증폭되고, 문턱전압이 -30 mV로 조정된 선별기(Discriminator; LeCroy 821)를 거치면 1.2 V의 크기와 100 ns의 폭을 가진 구형펄스가 생성되어 계수기(Scaler; LeCroy 2551)에서 설정된 측정시간 T 동안 입사한 이들 구형펄스의 수를 헤아린다.

광자계수장치의 gate 발생기로 측정시간 T 를 10 μ s, 20 μ s, 40 μ s로 조정된 상태에서 연마유리의 회전속도를 변화시키면서 광전자 분포의 변화를 측정하였으며, 또한 준열광원의 정확한 결맞음시간 τ 를 측정하기 위해서는 $\gamma T \sim 1$ 의 조건이 만족될 수 있도록 측정시간을 20 μ s에서

50 μ s로 변화시키고, 연마유리가 부착된 모터의 인가전압을 변화시켜 회전속도를 변화시키면서 광전자 분포를 측정했다. 이 때 측정시간동안 계수되는 평균 광전자수가 4개가 되도록 ND Filter를 사용하여 세기를 조정하였다. 측정된 자료는 광자계수장치에 부착되어 있는 PC(IBM

286)로 데이터를 처리하여 평균 광전자수와 가변도등의 통계를 얻을 수 있다. 본 실험에서는 한 조건에서 10,000 회 반복 측정함으로써 통계자료의 신뢰성을 높이고자 하였다.

IV. 결과 및 논의

측정조건에 따라서 광전자계수의 분포가 변화하는 것을 가변도의 값과 최다빈도의 계수로부터 확인하였다. 그림 2, 3, 4, 5, 6, 7은 측정시간 T 를 $10 \mu s$ 로 조정하고 연마유리 원판을 회전시키는 모터의 인가전압을 2V에서 25V까지 변화시켜 회전속도를 변화시켰을 때의 분포이다. 인가전압이 2V인 그림 2에서는 가변도가 16.27로서 광전자 계수가 0인 경우가 최대인 1657회이고 1개가 측정된 경우가 1639회로서 광전자수가 많아질수록 회수는 전반적으로 감소하는 경향을 보이며, 이는 Bose-Einstein 분포와 유사한 특성이다. 인가전압이 5V인 그림 3에서는 0의 경우가 감소하여 최다빈도의 광전자계수가 1258회이며, 가변도는 그림 2의 경우보다 감소하여 14.54였다. 인가전압이 최대 25V인 그림 7에서는 0의 계수 빈도가 많이 감소하였으며, 가변도가 6.712로 연마유리의 회전수가 증가할수록 0의 계수빈도가 감소하여 가변도가 점차 평균계수와 같아짐을 알 수 있다.

그림 8은 그림 2에서 7까지의 회전속도에 따른 가변

도의 변화를 그린 것이다. 가변도는 속도가 증가할수록 단조롭게 감소하여 평균계수에 접근하는 경향을 보인다. 그림 9, 10은 측정시간 T 를 $20 \mu s$, $40 \mu s$ 로 각각 고정한 후 연마유리 원판의 회전속도를 변화시키면서 가변도

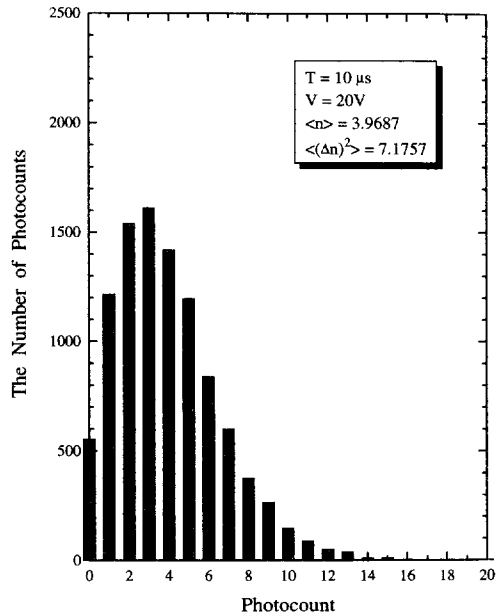


그림 6. 모터의 인가전압에 따른 광전자 분포.

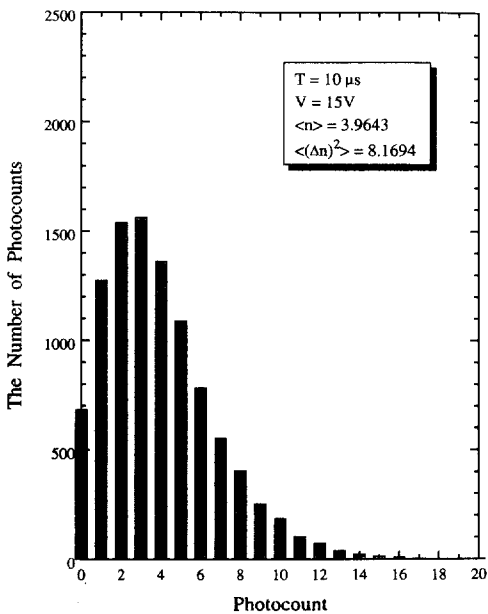


그림 5. 모터의 인가전압에 따른 광전자 분포.

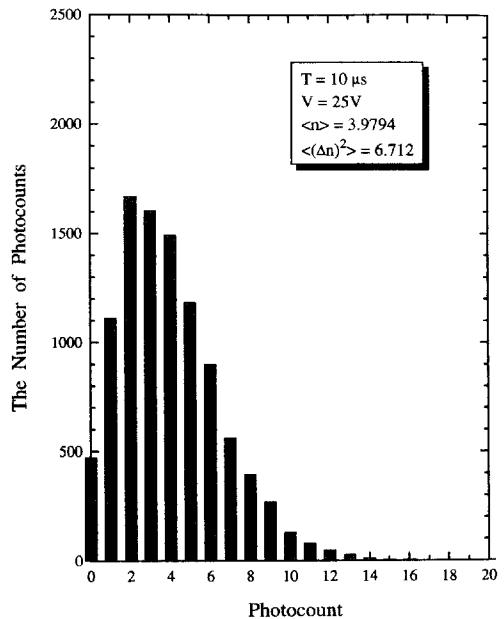


그림 7. 모터의 인가전압에 따른 광전자 분포.

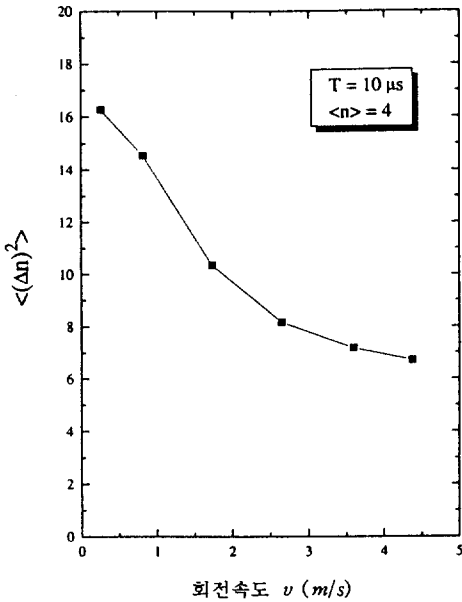


그림 8. 연마유리의 회전속도에 따른 $\langle(\Delta n)^2\rangle$ 의 변화.
 $T=10 \mu s, \langle n \rangle=4$

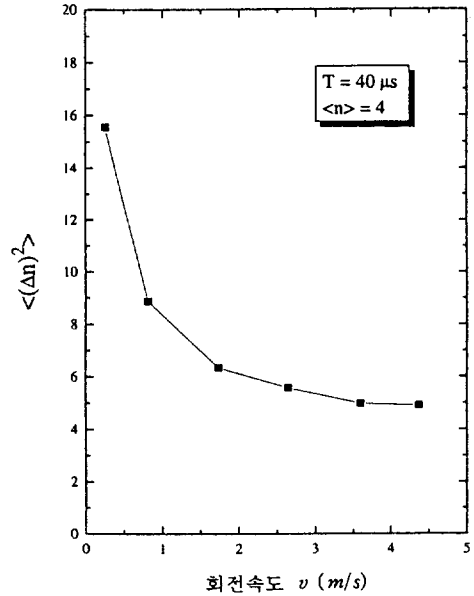


그림 10. 연마유리의 회전속도에 따른 $\langle(\Delta n)^2\rangle$ 의 변화.
 $T=40 \mu s, \langle n \rangle=4$

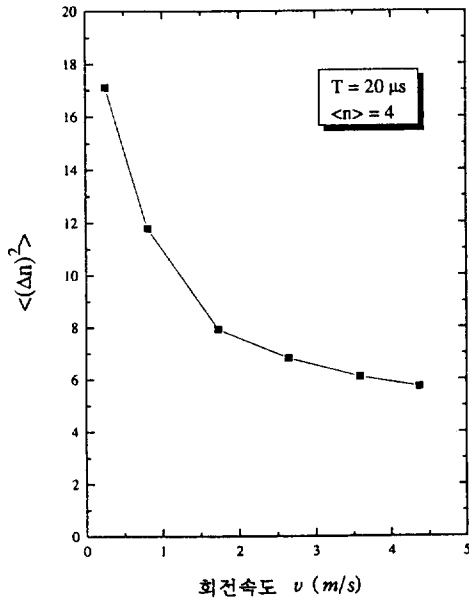


그림 9. 연마유리의 회전속도에 따른 $\langle(\Delta n)^2\rangle$ 의 변화.
 $T=20 \mu s, \langle n \rangle=4$

표 2. σ/v 에 의해 계산된 τ_c 와 광전자 분포에 의해 측정된 τ_c

Input Voltage	σ/v 에 의해 계산된 τ_c	광전자 분포에 의해 측정된 τ_c
2V	34.62 μs	31.4 μs
5V	11.11 μs	11.4 μs
10V	5.202 μs	5.38 μs
15V	3.396 μs	3.67 μs
20V	2.507 μs	2.92 μs
25V	2.059 μs	2.48 μs

결과와 일치하고 있다.^[8,9]

$\gamma T > 1$ 의 조건이 만족되도록 측정시간 T 를 가능한한 길게 취한 다음 연마유리의 특정 회전속도에 대한 분포를 측정하여 $\langle n \rangle$ 와 가변도 $\langle(\Delta n)^2\rangle$ 를 얻으면 식 (10)을 이용하여 τ_c 를 구할 수 있다. 인가전압이 2V와 5V일 때는 T 를 각각 50 μs , 30 μs 로 조정하고, 10V에서 25V까지는 T 를 공히 20 μs 로 조정하고 분포를 측정하여 각각의 회전속도에 해당하는 결맞음시간을 얻었다. 준열광원의 결맞음시간 τ_c 는 2V의 인가전압에서 31.43 μs 로 측정되었으며, 전압이 증가함에 따라 점차 감소하여 최대 인가전압 25V에서 2.48 μs 의 결맞음시간을 갖는 것으로 나타났다. 결맞음시간은 대체로 회전속도에 반비례하는 경향을 보였으며, 그 결과를 σ/v 에 의해 계산된

$\langle(\Delta n)^2\rangle$ 를 측정하는 것이다. 두 그림은 모두 속도 v 가 증가할수록 가변도는 감소하며 점차 $\langle n \rangle$ 의 값에 접근해가는 것을 알 수 있다. 이는 광전자 계수분포가 점차 푸아송 분포로 이동해감을 나타내며 (11)식의 이론적인

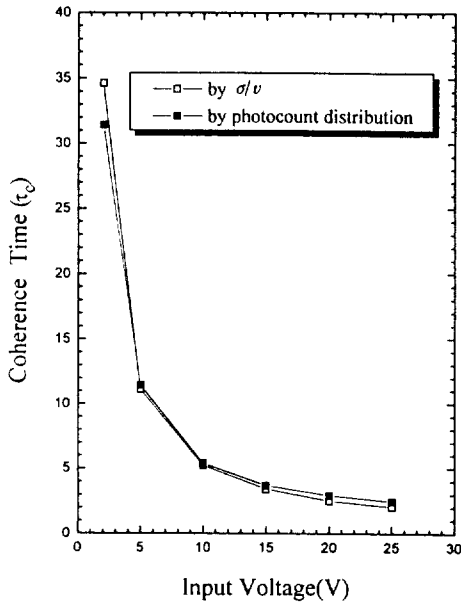


그림 11. σ/v 에 의해 계산된 τ_c 와 광전자 분포에 의해 측정된 τ_c 의 변화.

결과와 비교하여 표 2와 그림 11에 나타내었다. 본 실험에 의한 결맞음시간은 σ/v 로 계산되는 결과와 거의 일치하고 있음을 볼 수 있다.

V. 결 론

He-Ne 레이저빔을 한 면이 9 μm의 거칠기로 연마된 유리원판에 투과시켰을 때, 유리원판을 구동시키는 모터의 회전속도에 따라 결맞음시간이 변하는 특성을 가지는 준열광원을 제작하여 광전자 분포를 측정하였다.

구동모터의 인가전압을 2 V에서 25 V까지 변화시켰을 때, 연마유리원판의 회전속도는 0.26 m/s~4.37 m/s의

값을 가진다. 측정시간 T 를 10 μs, 20 μs, 40 μs로 하고 모터의 인가전압을 2 V에서 25 V까지 각각 변화시켰을 때, 고정된 T 에서 유리원판의 회전속도를 증가시킬수록, 즉 T 가 τ_c 에 비해 커질수록 분포의 가변도는 감소하여 평균에 접근하였다. 이를 통해 $T \gg \tau_c$ 가 될 때 광전자 분포는 푸아송 분포가 된다는 것을 알 수 있다.

$T/\tau_c > 1$ 의 조건이 만족되도록, 인가전압이 2 V와 5 V일 때는 T 를 각각 50 μs, 30 μs로 조정하고, 10 V에서 25 V까지는 T 를 공히 20 μs로 조정하고 분포를 측정하여 얻게 된 평균 $\langle n \rangle$ 과 가변도 $\langle (\Delta n)^2 \rangle$ 를 이용하여 연마유리의 회전속도에 따른 준열광원의 결맞음시간을 구하였다. 인가전압을 2 V, 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, 25 V로 각각 변화시키기에 따라서 τ_c 는 31.43 μs, 11.44 μs, 5.38 μs, 3.67 μs, 2.92 μs, 2.48 μs로 점차 감소하였다.

참 고 문 헌

- [1] H. R. Brown and R. Q. Twiss, *Nature*, **177**, 27 (1956).
- [2] 김현오, 이학석사학위논문, 울산대학교 (1995).
- [3] Rodney Loudon, *The quantum theory of light*, Clarendon press·oxford, (1983).
- [4] L. Mandel and E. Wolf, *Optical Coherence and Quantum Optics*, Cambridge University Press (1995).
- [5] E. Wolf and C. L. Mehta, *Phys. Rev. Lett.*, **13**, 705 (1964).
- [6] J. W. Goodman, *Statistical Optics*, John Wiley & Sons, Inc. (1985).
- [7] W. Martienssen and E. Spiller, *Am. J. Phys.*, **32**, 919 (1964).
- [8] E. Jakeman and E. R. Pike, *J. Phys.* **A1**, 128 (1968).
- [9] F. T. Arecchi, *Phys. Rev. Lett.*, **15**, 912 (1965).

Measurement of the Coherence Time of the Light from a Quasi-thermal Source

Heonoh Kim, Yang Ha, Jongtae Shin and Taesoo Kim

Department of Physics, University of Ulsan, Ulsan, Kyungnam 680-749, Korea

(Received: February 24, 1996)

The photocount distribution from a quasi-thermal light source, a moving ground glass disk (surface roughness; $9 \mu\text{m}$) illuminated by a well-stabilized He-Ne laser, is measured by a photon counting system, and analyzed with theoretical calculations. The distribution approaches the Poisson distribution for the long coherence time τ_c compared to the measuring time T .

The coherence time τ_c of the quasi-thermal source can be changed by controlling the velocity v of the motor driving the glass disk. By the comparison of experimental results and theory for the condition of $T/\tau_c \gg 1$, the coherence time τ_c of the quasi-thermal source is turned out to be in the range of $31.43 \mu\text{s} \sim 2.48 \mu\text{s}$ according to the circumferential velocity of the disk, and compared with the simple calculation of σ/v .