

가우스 광속의 중첩을 이용한 복사계용 구멍 면적의 비접촉 정밀측정

A Non-contact Precision Measurement of Radiometric Aperture Area by Gaussian Beam Superposition

강창호, 박승남*, 김석원
울산대학교 물리학과, *한국표준과학연구원
hoyaone@hotmail.com

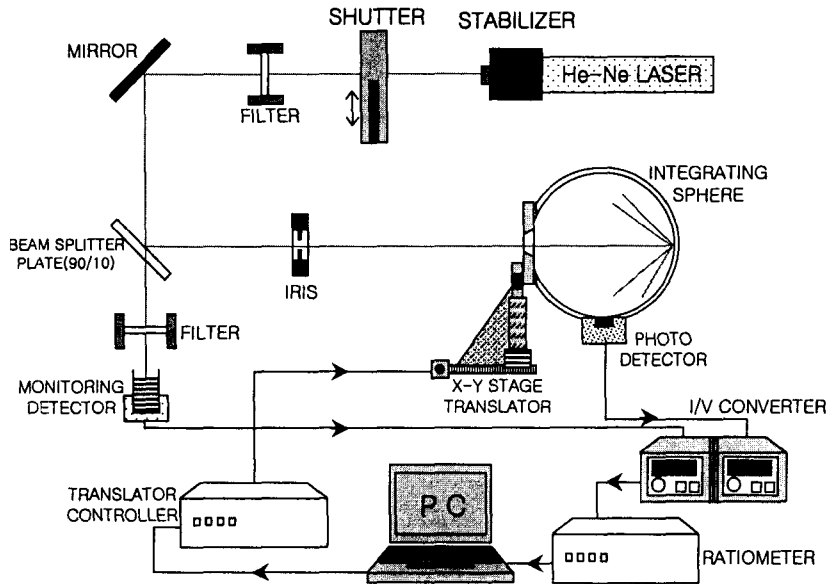
극저온복사계로부터 출발하여 광도의 기본 단위인 칸델라(Candela) 눈금은 물론 복사조도(irradiance), 조명도(illuminance)와 같은 유도 단위를 실현하기 위해서는 검출기의 시야를 한정하는 구멍의 면적을 측정하는 기술이 매우 중요하다.⁽¹⁾ 구멍의 면적을 측정하는 한가지 방법은 탐촉자를 물리적으로 접촉시켜서 구멍의 가장자리를 결정하고, 구멍의 기하학적 모양을 가정하여 면적을 계산하는 것이다. 이 방법을 사용하면 기계적인 접촉에 의하여 칼날과 같았던 구멍의 가장자리가 손상을 입게 되기 때문에 측정이 잘못되는 것은 물론이고, 이렇게 측정된 구멍을 사용하게 되면 손상된 부위에서 산란이 증가하게 된다. 이런 기계적인 탐촉자를 대신하여 광학적인 방법으로 가장자리를 검출하는 방법이 있지만 여전히 구멍의 기하학적 모양을 가정하여 면적을 계산하기 때문에 제작한 구멍이 가정한 기하학적 모양과 다를 때는 면적을 계산할 때 계통오차가 발생하게 된다.⁽²⁾

이 실험에서는 구멍의 면적보다 더 넓고 공간적으로 균일한 광원을 구멍에 수직인 방향으로 입사시킨 후 통과하는 광속을 측정하고, 이 광속을 입사하는 광원의 복사 조도로 나누어서 면적을 계산하는 원리를 사용한다. 이 방법은 비접촉 측정 방법이면서 구멍의 기하학적 모양에 구애받지 않으며 통과한 광속에는 회절에 의한 효과가 이미 들어가 있기 때문에 이 구멍을 사용할 때 회절효과에 의한 보정이 필요하지 않다. 공간적으로 넓은 영역에서 균일한 광원을 얻기 위해서는 공간 분포가 일정한 광원을 충분히 촘촘하게 중첩시키면 된다. 레이저와 같은 가우스 광속이 이 광속의 반치폭보다 충분히 촘촘한 격자 위치에서 동시에 중첩될 경우에 넓고 균일한 광원이 얻어진다. 실험에서는 한 대의 레이저를 사용하기 때문에 시간적으로 동시에 중첩시키는 것은 불가능하지만 레이저의 위치를 각 격자점으로 차근차근 이동하면서 각 격자점의 위치에서 통과하는 광속을 모두 더해주면 다음 식과 같이 면적이 얻어진다.

$$A = \Phi / E = \Delta x \Delta y \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_y} \Phi_{j,k} / \Phi_L$$

여기서 Δx , Δy 는 각 격자점의 x 축과 y 축 방향의 간격이고, $\Phi_{i,j}$ 는 각 격자점에서 통과한 광속의 세기, Φ_L 은 구멍의 영향을 받지 않을 때 레이저의 광속이다.⁽³⁾

이 실험에서는 레이저를 움직이지 않고, 대신에 구멍을 원하는 격자점의 위치로 이용하면서 구멍을 통한 광속을 적분구로 평균하여 측정하였다. 이 실험은 동시에 중첩시켜서 측정해야 할 광속을 모든 격자점으로 이동하면서 측정하기 때문에 레이저 세기의 안정도가 매우 중요하다. 따라서 세기 안정화 장치



를 추가로 사용하였을 뿐만 아니라, 모니터링 검출기의 신호에 대한 비율을 직접 측정함으로써 남아있는 표류를 보정하고, 잡음 특성을 향상시켰다. 검출기들의 선형성을 보장하기 위하여 광전류가 μA 이하의 수준을 유지할 수 있는 필터를 광로와 모니터링 검출기 앞에 설치하였다.

이 실험에서 처음으로 측정을 시도한 구멍은 직경이 7mm가 되도록 만들어진 원형으로, 알루미늄을 열처리 후 일차로 선반 가공을 한 후 흑연 처리를 하고 구멍의 가장자리가 칼날과

같이 날카로우면서 깨끗한 곡면이 되도록 다이아몬드 회전 가공기로 마무리하여 제작하였다. 구멍의 위치에서 레이저 광속의 반치폭은 약 1 mm 이고, 측정할 때 격자의 간격은 0.5 mm이며, 격자의 범위는 12 mm x 12 mm의 정사각형 모양이다. 이 격자 범위 밖에 있는 각 격자가 측정에 기여하는 정도는 암신호의 요동 수준인 1×10^{-5} 이하이다. 면적 측정의 반복도는 표준 편차로 2×10^{-4} 이고, 격자 간격 오차에 의한 면적을 보정하기 위하여 x-y 이동대의 이송 오차를 레이저 거리 측정기로 측정하였다. 이송 누적 오차는 x 축의 경우 $+0.086 \mu\text{m}/\text{mm}$ 이고, y 축의 경우에는 $-0.53 \mu\text{m}/\text{mm}$ 이며, 위치의 재현성은 모두 $0.2 \mu\text{m}$ 이하이다. 측정의 불확도를 분석하기 위하여 신호비의 안정도, 암신호의 표류, 격자 간격 변화에 의한 효과, 검출기의 비선형성에 의한 효과 등을 측정하였다.

앞으로 측정 방법에 의한 계통오차를 줄이기 위하여 이 측정 장치에 가장자리 검출법을 도입할 예정이다. 레이저 광선을 현미경 렌즈로 구멍의 평면에 집속한 후 x-y 이동대를 움직이면서 신호를 측정하여 구멍의 가장자리를 검출한 후 타원 방정식과 최소제곱법으로 맞추어서 방정식의 매개변수를 결정하고, 면적을 결정할 수 있다. 현미경 렌즈는 일축 이동대 위에 설치하여 항상 원하는 경우에 손쉽게 광로 상에 들어 올 수 있게 할 것이다.

참고문헌

- [1] Lassila A., Toivanen P., Ikonen E., "An optical method for direct determination of the radiometric aperture area at high accuracy", Meas. Sci. Technol. 8, 973-977 (1997).
- [2] Fischer J., Stock M., "A non-contact measurement of radiometric apertures with an optical microtopography sensor", Meas. Sci. Technol. 3, 693-698 (1992).
- [3] Ikonen E., Toivanen P., Lassila A., "A new optical for high-accuracy determination of aperture area", Metrologia 35, 369-372 (1998).
- [4] Stock M., Goebel R., "Practical aspects of aperture-area measurements by superposition of Gaussian laser beams", Metrologia 37, 633-636 (2000).