광범위 출력 측정이 가능한 레이저 계측장치 개발

황대석* · 이영우*

Development of the laser measurement system for the wide output power range

Daeseok Hwang* · Young-Woo Lee

요 약

넓은 출력 범위의 CO_2 및 Nd:YAG 레이저광 출력측정 및 교정을 위해 정밀한 칼로리미터를 제작하고 성능의 평가에 관한 연구를 수행하였다. 칼로리미터의 수광부는 금 코팅된 구리재질의 공동을 사용하여 제작되었다. 교정용 히터는 망가닌으로 제작되고, 출력 측정은 망가닌과 구리의 저항 브릿지를 사용하여 측정하였다. 교정 인자는 100W에서 489.13 J/mV이고 500W에서 497.04J/mV이다. Nd:YAG Laser를 이용하여 보정 계수를 구한 결과 100W일 때는 0.99이고 500W일 때는 1.006으로 레이저 에너지와 전기적 교정의 차이는 1%이하이다.

ABSTRACT

We have developed and estimated the measurement system of CO_2 and Nd:YAG laser power of wide range. The absorber is made of gold-plated copper cavity. The calibration heater is using a manganin(CuMn12Ni) coil, and output power is measured by using of resistance bridge with composed manganin and copper coil. Developed system can measure for 5~1000W laser output power range . Calibration factors are 489.13J/mV at 100W and 497.04(J/mV) at 500W. Correction factors are 0.99 at 100W and 1.006 at 500W.

키워드

Optical Power Measurement, Calorimetry, Laser Calibration

Ⅰ. 서 론

고출력 근적외 레이저는 현대 산업에서 절단, 용접 및 다양한 매질 가공 작업등 여러 용도로 사용된다. 이러한 고출력 레이저의 안전하고 정확한 사용을 위해 레이저 출력의 계측 및 조정은 매우 중요하다.

레이저의 출력측정에는 레이저의 파장과 출력 및 발진 방식에 따라 측정기 및 측정 방법도 바뀌게 된다. 광통신이나 거리측정 등에 사용하는 레이저의 경우는 미약한 μW정도의 계측이 필요하고, 레이저 가공 등의 경우는 수 십kW정도까지 측정 할 수 있어야한다. 또한 발진방식(연속광, 펄스광)에 따라서 측정기 및 측정 방법도 바뀌게 된다.

레이저 검출 소자로는 약 1mW이하의 출력을 갖는 가시광선과 근적외선 레이저의 경우에는 실리콘 광다이오드가 주로 사용되며, 1mW이상의 경우에는 ECR (Electrically

* 목원대학교 정보전자영상공학부

접수일자 : 2005. 9. 27

Calibrated Radiometer)형태의 초전체 (Pyroelectric) 검출기, 써모파일(Thermopile) 검출기, 레이저 칼로리미터 (Laser Calorimeter)등이 사용된다[1]. 이러한 검출 장비 중에서 레이저 칼로리미터는 레이저광의 출력이나 에너지를 전기적인 출력이나 에너지와 비교하여 측정하는데 사용된다. 레이저 칼로리미터는 watt나 joule 값을 단위로 하여 레이저광의 출력과 에너지를 측정할 수 있는 편리하고 정확한 교정 장비로 사용할 수 있다[2]. 레이저 칼로리미터는 측정하려 하는 레이저 에너지를 수광부에서 받아들여 열로 변환한 후 온도상승을 열기전력으로 바꾸어 측정하는 장치이다. 원리적으로 레이저를 열기전력으로 변환하기 때문에 레이저의 변화에 대한 응답 속도가 늦은 단점이 있지만, 레이저 칼로리미터는 정밀도도 높고, 레이저광에 대한 파장의존성이 작으며, 주위 온도 등 환경의 변화나 시간경과에 따른 오차가 작아 폭 넓게 사용된다.

본 연구는 현대 산업에서 넓은 응용을 가진 10.6μm 파장대인 CO_2 레이저와 1.06μm 파장대인 Nd:YAG 레이저의 출력을 자체 교정이 가능한 형태로 5~1000W까지 측정할 수 있는 레이저 칼로리미터를 제작, 성능평가를 수행하였다.

Ⅱ. 레이저 칼로리미터의 열역학

레이저 출력 및 에너지를 측정하기 위해서 사용된 레이저 칼로리미터는 외부 환경의 영향을 받지 않기 위해 일정한 온도하에서 측정한다. 칼로리미터에 대해 입력되는 레이저나 전기적 에너지는 온도의 형태로 시간에 따라 증가한 후 감쇠하는 지수함수의 무한열로 나타내어진다. 높은 차수들에 의해서 열 교환이 일어나는 현상은 칼로리미터를 설계하고 동작시키는데 충분히 고려되어야한다[3].

레이저 칼로리미터의 동작은 다음의 두 식으로 표현할 수 있다.

$$W = E[T_F - T_I + \epsilon \int_{t_F}^{t_I} (T - T_\infty) dt] \quad (1)$$
$$= E\Delta T_C$$

$$\frac{dT}{dt} = -\epsilon (T - T_\infty) \quad (2)$$

여기에서 W 는 흡수부에 흡수된 전기에너지 또는 레이저 에너지, E는 교정인자, $T_F T_I$는 최종 평가 구간 t_F와 초기 평가 구간 t_I에 측정된 흡수부의 온도, ϵ는 냉각상수, T는 초기 평가 구간과 최종 평가 구간 사이에서의 온도, T_∞는 평형 온도, ΔT_C는 변환 온도 상승이다.

E, T_∞, ϵ값은 칼로리미터의 특성을 나타내는 상수이다. 레이저광이 입사하는 칼로리미터의 구멍을 통해서 칼로리미터는 실험실 주변과 열을 교환하므로 실험실 온도의 변화는 T_∞값에 영향을 주며, 이 값은 시간에 따른 실험실의 온도변화에 대한 매우 작은 변화이다. 냉각상수 ε은 칼로리미터 내의 공기의 압력에 의해서 영향을 받는다. 시간에 따른 예측 가능한 변동이 있다고 하더라도, 교정 인자 E는 요구되는 정밀도 내에 있는 상수로 남아야한다. 교정요소 E는 T_∞와 ε가 매 실험에서 다르다고 해도 크게 영향을 받지 않는다[3].

Ⅲ. 레이저 칼로리미터의 구조

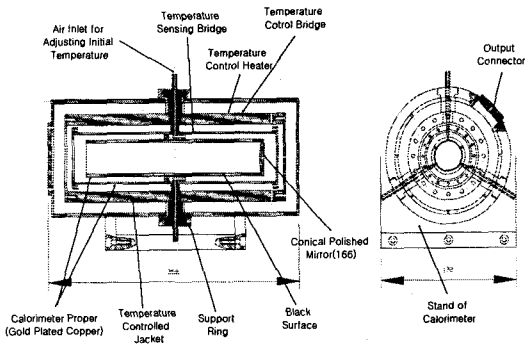

그림 1. 레이저 칼로리미터의 구조도
Fig. 1. Schematic of the Laser Calorimeter

그림 1은 제작된 칼로리미터의 개략도이다. 그림 1에서 칼로리미터는 크게 세부분으로 나뉜다.

첫 번째 부분인 칼로리미터 본체는 흡수부와 보호부로 나뉘어져 있다. 본체의 역할은 레이저 에너지나 전기적 에너지를 받아 온도 상승을 측정하는 역할을 하며, 금 코팅된 구리로 제작되었다. 흡수부의 내부는 입사되는 레이저를 분산시켜 흡수하는 역할을 한다.

흡수부 외부에는 전기적 교정을 위해 망가닌 코일로 된 히터가 쌍선으로 감겨있다. 흡수부를 감싸고 있는 보호부는 본체의 변환 온도 상승을 측정하기 위해 구리와 망가닌으로 된 코일이 저항브릿지 형태의 쌍선으로 감겨있다. 두 번째 부분인 칼로리미터 온도 조절 자켓은 온도 조절을 위한 가열용 구리선과 온도 검출을 하기 위해 구리와 망가닌이 브릿지 형태의 쌍선으로 감겨 있다. 온도 조절 자켓은 외부와의 에너지 교환을 막기 위해 온도 검출용 브릿지에서 검출된 온도 변화를 궤환하여 온도 조절을 위한 가열용 구리선에 전기적 에너지를 가해 일정한 온도를 유지시켜 준다. 제작된 레이저 칼로리미터의 온도 안정도는 $5mK$이내의 정확도를 갖는다. 세 번째 부분인 외부 케이스는 칼로리미터를 보호하는 부분으로, 외부 케이스에는 칼로리미터 본체와 온도 조절 자켓을 연결하기 위해 120°각도로 3개의 지지링이 삽입되어 있다.

Ⅳ. 레이저 칼로리미터의 성능 평가

1. 전기적 입력을 통한 칼로리미터 특성 측정

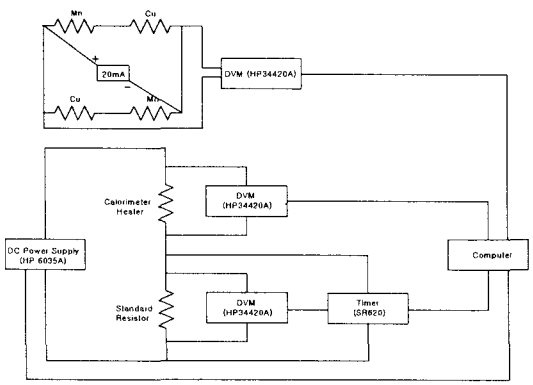

그림 2. 레이저 칼로리미터의 전기적 교정을 위한 구성도
Fig. 2. Diagram for Electrical Calibration of the Laser Calorimeter

그림 2는 칼로리미터의 전기적 교정을 위한 구성도이다. 전기적 교정을 위해 본 실험에서는 칼로리미터 흡수부 망가닌 코일 히터에 입력되는 전류를 측정하기 위해 표준 저항을 망가닌 코일 히터와 직렬로 연결하였다. 전원 공급을 위해 칼로리미터 흡수부의 망가닌 코일 히터에 DC 전력 공급기(HP6035A)를 사용하였다. 흡수부 망가닌 코일 히터와 표준 저항에 걸리는 전압의 측정을 위해 DVM(HP34420A)을 사용하였고, 전원이 공급된 시간을 측정하기 위해 표준 저항에 병렬로 디지털 카운터(SR620)을 연결하였다. 망가닌 코일 히터의 흡수부 가열에 의한 변환 온도 상승 ΔT_C를 측정하기 위해 보호부의 변환 온도 측정용 망가닌-구리 저항 브릿지의 전압을 DVM (HP34420A)로 측정하였다. 흡수부와 보호부에서 측정된 값은 PC에 입력된다. 입력된 데이터에 의해 공급된 전기적 에너지 W와 변환 온도 상승 ΔT_C로 교정인자 E를 구한다. 전기적 교정은 칼로리미터의 교정인자 E를 구하기 위한 과정이다. 교정 인자 E는 칼로리미터에 일정 시간 동안 전기적 에너지 W를 가하고 시간에 따른 흡수부의 변환 온도 상승 ΔT_C를 측정하여 식 (1)에 의해 구할 수 있다.

본 실험에서는 첫째로 입력된 전기적 에너지 변화에 따른 교정 인자 E를 구하기 위해 시간을 고정한 후 전기적 에너지 세기를 변화시켜 측정하였고, 둘째로 입력 시간 변화에 따른 교정인자 E의 변화를 측정하기 위해 전력을 고정한 후 시간을 변화시켜 측정하였다.

첫째로 시간을 고정한 후 전기적 에너지 세기를 5~100W, 100~500W로 나누어 측정하였다. 이와 같이 측정하는 이유는 망가닌 선이 입력된 전기적 에너지 세기에 따라 절연 파괴 시간이 달라지기 때문이다. 각 단계별로 입력된 전기적 에너지는 5~100W사이에서는 25초 동안 20W, 60W, 100W를 입력하고(그림 3), 100~500W사이에서는 5초 동안 100W, 300W, 500W의 에너지를 입력하여(그림 4) 측정하였다.

둘째로 전력을 고정한 후 시간을 변화시켜 시간의 변화에 대한 교정 인자 E의 변화를 측정하였다. 첫 번째 단계에서 전력을 100W로 고정하고 시간을 5초, 15초, 25초로(그림 5), 두 번째 단계에서는 전력을 500W로 고정하고 시간을 1초, 3초, 5초로(그림 6) 변화시켜 측정하였다. 전기 에너지의 변화와 입력 시간에 따른 변화의 결과에서 칼로리미터의 교정 인자는 100W 범위에서 약 489.13(J/mV)이고 500W 범위에서 약 497.04(J/mV)였다.

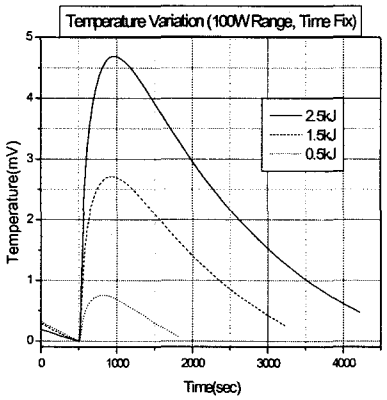

그림 3. 전기에너지 변화에 대한 흡수부 온도 변화 (전기에너지 입력시간 25초)
Fig. 3. Absorber temperature variation against time for various electric energies when the energies input time is 25s

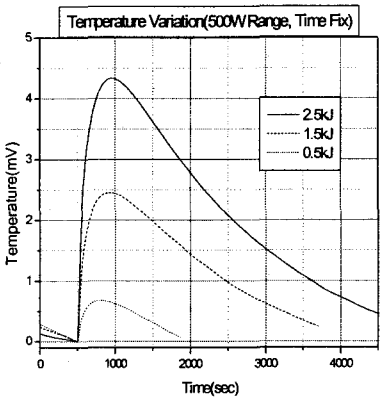

그림 4. 전기에너지 변화에 대한 흡수부 온도 변화 (전기에너지 입력시간 5초)
Fig. 4. Absorber temperature variation against time for various electric energies when the energies input time is 5s

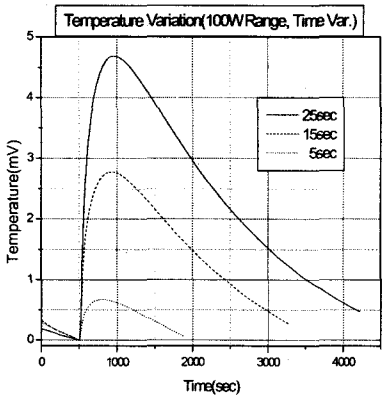

그림 5. 전기에너지 변화에 대한 흡수부 온도 변화 (전력 100W, 입력시간 5초, 15초, 25초)
Fig. 5. Absorber temperature variation against time for various electric energies when the electrical power is 100W and the energy input time is changed

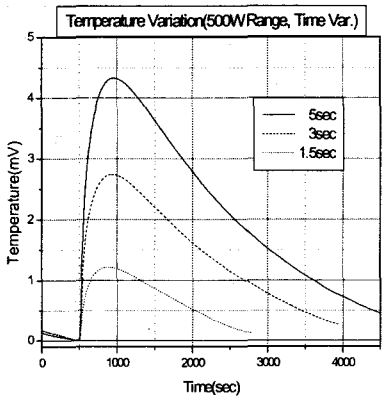

그림 6. 전기에너지 변화에 대한 흡수부 온도 변화 (전력 500W, 입력시간 1초, 3초, 5초)
Fig. 6. Absorber temperature variation against time for various electric energies when the electrical power is 500W and the energy input time is changed

2. 레이저 입력과 전기적 입력 차이에 대한 보정 계수 측정

그림 7은 레이저 에너지를 측정하기 위한 장치도이다. 레이저빔은 셔터에 의해 입사되고 입사되는 시간은 동일시간에 셔터를 통과하는 He-Ne 레이저를 검출하여 디지털 카운터(SR-620)에 의해 측정된다. 입사된 빔은 칼로리미터 본체의 흡수부에서 Conical Mirror에 의해 분산되어 흡수된다. 흡수부에서 흡수된 빔은 열에너지로 변환되어 구리링을 통해 보호부로 전달되고 보호부의 저항 브릿지에서 변환 온도 상승 ΔT_C를 측정하여 레이저의 실제적인 출력을 구할 수 있게 된다.

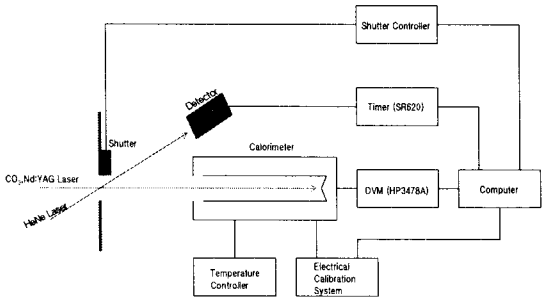

그림 7. 레이저 출력 측정을 위한 실험 장치도
Fig. 7. Experimental Setup for Laser Power Measurement

측정을 시작하기 전에 흡수부의 온도 변화율이 식 (2)를 만족할 만큼 작아야 한다. 그러나 실제적으로는 시간에 따른 흡수부의 온도 변화율이 0이 될 때까지 기다리지 않고 초기 평가 구간의 온도 변화율이 최종 평가 구간의 온도 변화율의 10%이하일 때 측정을 한다.

레이저 칼로리미터에서 흡수부의 레이저 에너지 흡수율이 이상적으로 100%가 될 수 없기 때문에 흡수부의 흡수율에 대해 보정을 해야 한다. 또한 흡수부 외부에서 공급되는 전기 에너지와 내부에서 흡수되는 레이저 에너지는 서로의 에너지 흡수 조건이 서로 다르기 때문에 보정해야 한다.

본 실험에서는 흡수부의 흡수율 보정에서 전기 및 레이저 에너지의 흡수 차이에 대한 보정 계수를 구하였다. 그림 8은 보정 계수 측정을 위한 실험 장치도이다. 보정 계수 측정용 레이저로는 Nd:YAG(1064nm ; 안정도 1%)를 사용하였다. 레이저가 입사된 시간을 측정하기 위해 He:Ne 레이저를 사용했다. 본 연구에서는 제작된 칼로리미터의 보정 계수를 구하기 위해 Reference Power Meter로 Coherent INC. LabMaster에 LM-200 HTD Standard Sensors를 사용하여 레이저 에너지를 측정하였다.

칼로리미터로 측정되는 레이저 에너지 W_I는 다음과 같이 표현된다.

$$W_I = \frac{E \cdot \Delta T_d}{\alpha} \tag{3}$$

여기에서 E는 교정인자, ΔT_d는 레이저에너지 입력에 의한 온도 변화, α는 보정 계수이다.

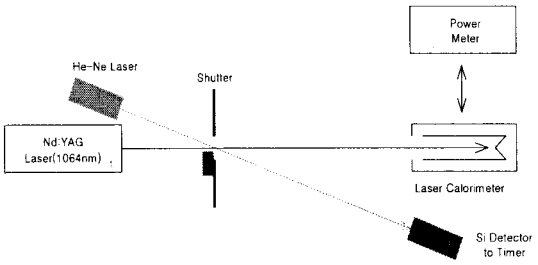

그림 8. 보정 계수의 측정을 위한 실험 장치도
Fig. 8. Experimental Setup for Measurement of the Correction Factor

이를 입사 경과 시간과 Reference Power Meter로 측정한 레이저 출력을 사용하여 흡수부에 입사된 레이저 에너지 W_I를 구하는 보정 계수식은 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{E \cdot \Delta T_d}{W_I} \tag{4}$$

흡수부에 입사되는 Nd:YAG 레이저의 출력을 20W로, 입사 시간을 25초로 했을 때 전기적 교정에서 측정한 E와 칼로리미터에 레이저 에너지를 입사하여 측정한 ΔT_d를 식 (4)을 이용하여 구한 보정 계수는 100W일때는 0.99이고 500W일때는 1.006이다.

V. 결 론

최근 넓은 분야에서 다양한 응용을 가진 고출력 CO_2 레이저 Nd:YAG 레이저의 계측 및 교정을 하기 위한 레이저 계측 장치를 개발하고 장치의 성능을 평가하였다. 제작된 레이저 칼로리미터는 5~1000W의 광대역 레이저 출력을 측정할 수 있다. 광대역 레이저를 측정하기 위해 100W와 500W에서 교정 인자와 보정 계수를 측정하였다. 외부 환경의 영향을 제거하기 위해 5mK이하의 온도 변화율을 가진 항온조를 제작하여, 외부 환경의 영향을 최소화한 상태에서 측정된 칼로리미터의 교정 인자는 100W 에서 약 489.13 J/mV이고 500W에서 약 497.04J/mV이었다. 출력에 대해 1%의 안정도를 가진 Nd:YAG레이저를 사용하여 보정 계수를 구한 결과 100W일때는 0.99이고 500W일 때는 1.006으로 레이저 에너지와 전기적 에너지의 흡수율 차이가 1%미만으로 구조적으로 매우 잘 설계되었음을 알 수 있다.

참고문헌

[1] 김용완, 신동주, 최종운, 정영붕, 이인원, "레이저 출력 측정을 위한 열량계 제작 및 특성 평가", 응용물리 vol.9, no. 4, 435(1996),

[2] E. D. West, "Data Analysis for Isoperibol Laser Calorimetry", NBS Tech. Note 396,(1971)

[3] E. D. West, W. E. Case, A. L. Rasmussen, and L. B. Schumidt, "A Reference Calorimeter for Laser Energy Measurements", J. Res. Nat. Bur. Stand.(U.S.), 76A(Phys. and Chem.), no. 1, 13(Jan.-Feb. 1972),

저자소개

황대석(Daeseok Hwang)

2000년 2월 목원대학교 대학원 전자공학 전공(공학석사)
2000년 3월-2002년 2월 (주)코닉스 연구원
2002년 3월- 현재 목원대학교 대학원 IT공학과 박사과정
※관심분야 : 광통신 및 광계측

이영우(Young-Woo Lee)

1985년 2월 경희대학교 대학원 전자공학전공(공학석사)
1990년 5월 일본 Keio University 전기공학 전공(공학박사)
1990년 6월-1992년 2월 독일 Max-Plank 연구소 연구원
1992년 3월 - 현재 : 목원대학교 전자정보영상공학부 교수
※관심분야 : Biomedical Photonics