

형광체를 이용한 연소기 표면온도 측정기술

김용규*[†] · 이석환* · 김성훈* · 양인영**

Measurement of combustor surface temperature using phosphor thermometry

Yong-Gyoo Kim*[†] · Seok Hwan Lee* · Sunghun Kim* · Inyoung Yang**

ABSTRACT

The surface temperature of a combustor such as an aircraft engine is one of the important measuring factors related to the combustion performance. However, a conventional temperature measurement technique have a large measurement error due to a bad environment such as a combustion flame, vibration, and dust. In order to solve this problem, a technology has been developed which can measure the surface temperature of the combustor in real time using the wavelength change or attenuation time change according to the temperature of the phosphor. In this study, we developed a technique that can measure surface temperature of scram-jet combustor using phosphor thermometry. The calibration curve was obtained according to the temperature from 200 °C to 800 °C in the calibrated temperature chamber. So, we confirmed that phosphor thermometry can be used for measuring surface temperature of scram-jet combustor.

초 록

항공기 엔진 등 연소기의 표면온도는 연소성능과 관련된 중요한 측정인자 중의 하나이나 통상적인 온도측정 기술로는 연소화염이나 진동, 분진 등의 열악환경으로 인해 측정오차가 매우 큰 측정량이다. 이를 해결하기 위한 기술로 형광체의 온도에 따른 감쇠광의 파장변화 혹은 감쇠시간 변화를 이용하여 실시간으로 연소기 표면온도를 측정할 수 있는 기술이 개발되었다. 본 연구에서는 스크램젯 연소기 내부 표면온도르르 in-situ 상태에서 측정할 수 있는 기술을 개발하기 위한 일환으로 355 nm 파장의 레이저로 여기된 Dy:YAG 형광체의 온도에 따른 분광특성을 최대 800 °C까지 측정하였고, 전기로 내에서 교정된 열전대를 이용하여 형광온도계의 교정곡선을 구하였다.

Key Words: Phosphor thermometry(형광 온도계), Scramjet combustor(스크램젯 연소기), Surface temperature(표면온도)

1. 서 론

스크램제트 엔진을 추진기관으로 사용하는 극 초음속 비행체는 로켓 추진 비행체와 비교하여 동일 추진체 대비 장거리 비행이 가능하여 군사용 유도 무기 분야뿐만 아니라 우주 발사체 분야, 초고속 정찰기 및 수송기 분야에서 유망한 미래 항공 기술로서 주목받고 있다. 스크램제트 엔진은 초음속의 연소 반응에 의해서 연소기의 벽면의 온도가 상승하게 되어 엔진의 안전성 및 효율향상을 위해 고온의 연소기 벽면을 냉각해 주어야 한다. 그래서 연소기 벽면의 온도를 측정하는 것이 중요한 기술 중에 하나이다. 연소기 벽면의 온도를 측정하는 방법으로는 열전대를 연소기 표면에 부착하여 측정하는 방법[1]과 thermal paint를 이용하는 방법[2], pyrometry를 이용한 방법[3] 등이 있다. 하지만 위의 표면 온도 측정 방법들은 직접 삽입을 해야 하거나 측정 지점에 한계가 있거나 화염이나 입자에 의한 방해로 인해 표면온도 측정에 정확도가 현저하게 떨어지는 단점들이 있어 초음속 연소기와 같은 열악환경에는 적합하지 않다.

형광온도계(Phosphor thermometry)는 희토류의 물리적인 특성을 이용하여 전자 여기 및 방사되는 정도가 온도의 함수임을 이용한 온도계이다. UV 파장의 레이저를 형광 물질에 조사하면 온도에 따른 특정 파장의 세기가 변화되고 이를 이용하여 표면의 온도를 측정하게 된다 [4-6]. 이 기술은 순간적으로 고온의 온도 (최대 1200 °C)를 수 ns 안에 측정할 수 있어 화염이나 입자가 존재하는 연소환경 내에서도 표면의 온도를 측정할 수 있다. 하지만 이러한 형광온도계를 활용하여 초음속 연소기의 표면 온도를 측정 한 연구는 아직 수행된바 없으며 본 연구는 이러한 연구의 기초연구로서 초음속 연소기에 사용되는 CMC 샘플의 표면온도를 형광온도계를 활용하여 고온에서 측정하는 연구가 수행되었다.

* 한국표준과학연구원 기반표준본부

** 한국항공우주연구원 엔진시스템 연구팀

† 교신저자, E-mail: dragon@kriss.re.kr

2. 본 론

2.1 실험 방법

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 실험 셋업을 보여준다. 본 연구의 목적인 고온에서의 표면온도 측정을 위해서 0 °C에서 1000 °C까지 온도 조절을 할 수 있는 고온 온도 교정로를 사용하였다. 그리고 고온의 교정로에 YAG:Dy 가 코팅된 CMC(Ceramic Matrix Composite)(Fig. 2)를 교정로 안에 삽입하였다. YAG:Dy는 Yttrium Aluminum Oxide에 Dysprosium 4% 가 함유된 파우더 형태를 사용하였고 파우더의 크기는 약 10 μm 이다. YAG:Dy 파우더를 코팅하기 위해서 세라믹 접착제(Cotronics Resbond)를 사용하였고 YAG:Dy 와 세라믹 접착제를 1:2의 비율로 섞어서 코팅하였다. CMC 샘플의 기준 온도는 샘플 뒤에 Fig. 2 와 같이 홀을 내어서 표면의 온도를 측정할 수 있게 하였다.

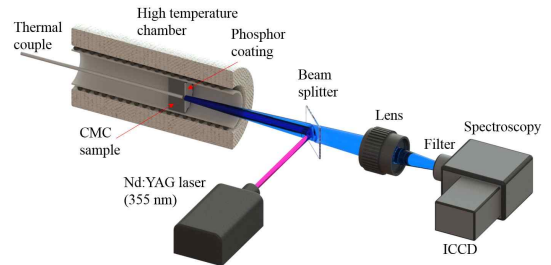


Fig. 1 Schematic of phosphor thermometry

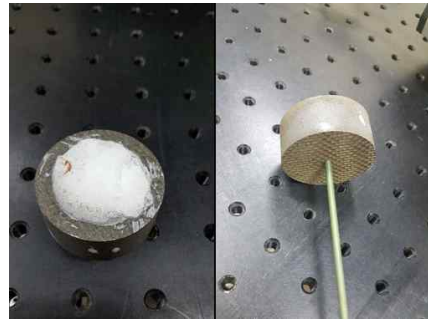


Fig. 2 CMC specimen coated with YAG:Dy

Phosphor thermometry로 표면온도를 측정하기 위해서 Nd:YAG 펄스 레이저가 사용되었다. Third harmonic generator 를 사용하여서 Nd:YAG 레이저의 파장을 355 nm 로 변환하여 사용하였다. 레이저의 펄스 폭은 5 ns 이고 레이저 에너지는 펄스당 15 mJ 이었다. 레이저를 355 nm 파장 반사시키는 beam splitter를 이용하여 교정로 안의 CMC 로 보냈다. YAG:Dy phosphor 에 355 nm 파장의 레이저를 조사하면 400 nm 이상의 파장에서 형광신호가 발생하는데 이는 beam splitter를 투과하여서 렌즈와 355 nm 레이저를 막아주는 광학 필터를 거쳐서 분광기(Andor Holospec-F/1.8)로 보내어졌다. 분광기는 367 nm에서 813 nm 까지의 범위의 파장을 0.96 nm 의 정밀도를 가지고 분광할 수 있다. 분광된 빛은 ICCD (Andor I-star)로 측정되었고 노출 시간은 200 ns 였다.

2.2 실험 결과

Fig. 3 는 본 실험에서 얻어진 온도에 따른 분광 신호를 보여준다. YAG:Dy phosphor 에 355 nm 파장의 레이저를 조사하면 445 nm(λ_3)에서 465 nm(λ_4) 에서 한 개의 peak 이 발생하고 487 nm(λ_1)에서 507 nm(λ_2)에서 또 다른 peak 이 발생한다. 이 두 개의 peak 은 온도에 따라서 다른 성질을 보이는데 Fig. 3 에서 보여주는 바와 같이 λ_1 - λ_2 의 peak 은 온도가 증가할수록 peak 의 크기가 감소하고 λ_3 - λ_4 의 peak 은 온도가 증가할수록 peak 의 크기가 감소한다. 식 (1)은 λ_1 - λ_2 , λ_3 - λ_4 peak 들의 세기 비로 이 식을 이용하여 얻은 신호비를 이용하여 온도를 측정할 수 있게 된다.

$$Intensity\ ratio = \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} I(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

Fig. 4 는 F식 (1)을 통하여 얻은 신호세기 비를 온도에 따라서 나타낸 것이다. 보이는 바와 같이 온도에 따라서 신호의 세기비가 직선형으로 나타나는 것을 볼 수 있다.

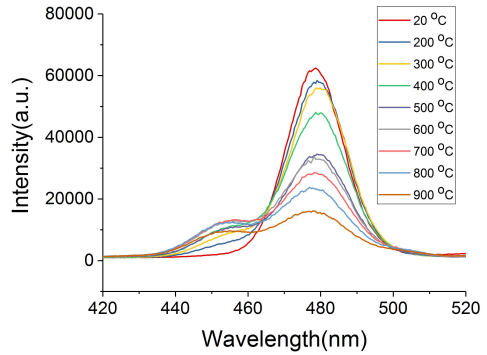


Fig. 3 Luminescence spectra of YAG-Dy, excited at 355 nm.

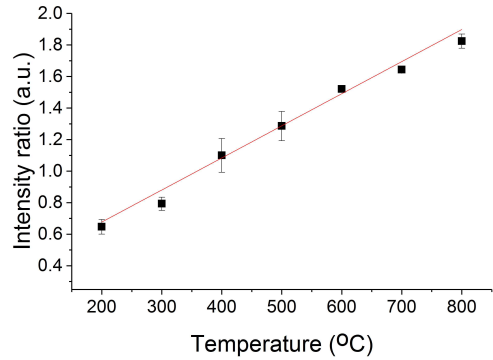


Fig. 4 YAG:Dy temperature calibration curve, excited at 355 nm.

Table 1 Fitting value of signal intensity ratio in Fig. 4

	Slope	Intercept	R-Square
Value	0.00203	0.27003	0.97213

이를 이용하여 온도 보정 곡선을 얻을 수 있어 형광온도계로 온도를 측정할 수 있게 된다. 직선형의 보정 곡선의 fitting 값은 Table 1과 같다. 보정 곡선의 직선성 및 측정 정확도는 여러 가지 요인에 기인하게 되는데 레이저 에너지의 불확도, phosphor 파우더의 조성, phosphor coating 의 균일성 등을 고려하여 이를 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 형광온도계의 초음속 연소기에서의 표면온도 측정을 위한 연구의 기초연구로 초음속 연소기의 재료로 사용되는 CMC 샘플 표면의 온도를 형광온도계로 측정하여 온도 교정로를 이용하여

보정곡선을 얻는 연구가 수행되었다. 이를 통하여 추후 실제 초음속 연소기 표면온도를 in-situ 하게 측정할 수 있을 것이다.

3. 결 론

본 연구에서는 초음속 연소기 표면온도 측정을 위한 형광온도계(phosphor thermometry)의 온도 보정곡선을 얻는 연구가 수행되었다. 200-800 °C까지 예서의 온도를 교정로를 통하여 구현하였고 이를 교정된 온도계를 이용하여 온도소급체계로부터 측정된 기준온도를 얻었다. 교정로에 YAG:Dy phosphor 가 코팅된 CMC 샘플 넣고 표면온도를 측정하였다. 형광 온도계로부터 분광신호를 얻어 온도에 따라 다르게 거동하는 두 개의 peak(445 nm-465 nm, 487 nm-507 nm)들을 얻었다. 이 두 개의 peak 의 신호 세기 비가 온도에 따라서 직선형의 특성을 갖는 것을 확인하였고 이를 이용하여 온도 보정 곡선을 얻었다. 이 온도 보정곡선을 이용하여 실제 초음속 연소기의 표면온도를 in-situ 하게 측정할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2016년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 민간융합기술연구사업 (No. CMP-16-06-KARI)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

1. Bird, C., Shepherd J. E., Simith, M. D. W.,

and Watson, H. M. L., "Surface temperature measurements in turbines. in symposium on advanced non-intrusive instrumentation for propulsion engines," Brussels : AGARD PEP, 1992.

2. Dunker, R., "Advances in techniques for engine applications," Wiley, 1992.

3. Alaruri, S., Bianchini, L., Brewington, A., "Effective spectral emissivity measurements of superalloys and YSZ thermal barrier coating at high temperatures using a 1.6 μ m single wavelength pyrometer," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 30, 77, 1998.

4. Yu, M., Sarnar, G., Luijten, C. C. M., Richter, M., Alden, M., Baert, R. S. G., and Goey, L. P. H., "Survivability of thermographic phosphors (YAG:Dy) in a combustion environment," Measurement Science and Technology, Vol. 21, 027002, 2008.

5. Hashemi, A., Vetter, A., Batentschuk, M., and Brabec, C. J., "Temperature measurements using YAG:Dy and YAG:Sm under diode laser excitation(405 nm)," Measurement Science and Technology, Vol. 26, 075202, 2015.

6. Someya, S., Okura, Y., Munakata, Y., and Okamoto, K., "Instantaneous 2D imaging of temperature in an engine cylinder with flame combustion," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 62, 382, 2013.