

열감지인광온도계를 이용한 물에 잠긴 물체 표면 온도장의 비접촉식 측정에 관한 연구

박윤성* · 차이타오* · 김경천†

A Study on Non-contact Surface Temperature Field Measurement of a Body Immersed in Water Using Thermographic Phosphor Thermometry

Yoonseong Park*, Tao Cai* and Kyung Chun Kim†

Abstract Thermographic phosphor (TP) thermometry is a noncontact optical measurement method and has been applied in many fields such as combustion and heat transfer. However, due to the limitation of bonding technology and measurement method, most TP thermometry studies were conducted only on the air environment with water-soluble binders. In this paper, a temperature measurement technology in water using TP is proposed by coatings of manganese activated magnesium fluorogermanate ($Mg_4FGeO_6:Mn^{4+}$, MFG) with Polydimethylsiloxane (PDMS). Four MFG-PDMS coatings with different thicknesses were prepared. The lifetime of MFG was not affected by the thickness of the coating as a result of the experiment and analysis of phosphor intensity using a photomultiplier tube. To measure the surface temperature field of an immersed body in water, a cylinder-type cartridge heater was coated with MFG doped PDMS. Transient surface temperature field was successfully measured even the initial temperature is higher than the boiling point of water.

Key Words : Thermographic phosphor thermometry(열감지인광온도계), Temperature field measurement (온도장 측정), Immersed body in water(물속에 잠긴 물체)

1. 서론

물 속에서의 고체 표면 온도 측정은 켈칭 및 핵연료봉과 같은 산업 발전에 필수적인 요소이다. 켈칭은 훨씬 더 차가운 액체에 노출되어 매우 뜨거운 고체 물체를 빠르게 냉각시키는 것을

말한다. 켈칭시 일반적인 온도 측정법으로는 열전대와 같은 접촉식 센서를 사용하는 방법이 있다. 열전대의 부착으로 인해 냉각수의 유동을 변화시키기 때문에 직접 적용하기 곤란하고, 비접촉식 적외선 온도계의 사용은 냉각 도중에 발생하는 수증기, 표면 스케일 등의 영향으로 표면온도를 정확하게 측정할 수 없다^(1,2).

대부분 고온 강재의 켈칭에서는 강재의 냉각이 진행되는 동안 동시에 내부 강재의 내부 지점에서 온도를 기록하여 연구가 이루어져왔다⁽³⁾. 또한, 원자로 발전기의 냉각시스템은 대부분 수

† School of Mechanical Engineering,
Pusan Nation University, Busan, South Korea
E-mail: kckim@pusan.ac.kr

* School of Mechanical Engineering,
Pusan Nation University, Busan, South Korea

냉식을 사용하며, 열전대와 같은 접촉식 온도계를 사용하여 냉각시스템 등 원자로 발전기의 각 구간 온도를 제어한다.

물 속의 고체 표면 온도 측정을 위해 사용 할 수 있는 온도 측정 기법은 대표적인 접촉 방식의 열전대 (Thermocouple)가 있다. 하지만 점 측정 방식으로 표면온도장을 획득하기 위해서는 부적합하다.

대표적인 표면 온도장 획득을 위한 측정 기법은 적외선 (IR) 카메라가 있으며 수많은 연구가 진행되었다^(4,5). 하지만, 가장 큰 단점으로 물체에서 방출되는 방사율을 이용한 측정법 이므로 물 속의 고온체의 온도장을 직접 측정하는데 큰 제약이 있다. 또한, Thermochromic Liquid Crystals (TLC)⁽⁶⁾를 이용한 비접촉 온도 측정은 사용 온도 범위가 좁게 제한적이며, 100°C 이상의 고온 환경에 대하여 측정에 제약이 있다.

최근 많은 개발이 이루어지고 있는 열감지 인광체 (Thermocouple phosphor)는 고온의 극한 측정 환경에 대한 영향을 거의 받지 않는 온도장 측정 기법 중의 하나로써, 온도의 변화에 따른 열감지 인광체의 발광 특성의 변화를 이용하여 온도를 측정한다. 특히, 인광수명법을 이용하여 1%이내로 온도 오차까지 가능하다⁽⁷⁾. 현재 연소 엔진^(8,9), 냉각 제트⁽¹⁰⁾, 연료 연소⁽¹¹⁾ 등 다양한 응용분야에 적용되고 있다.

열감지 인광체를 이용한 연구에서 인광체를 고정시키기 위해 많은 결합제가 연구되었다⁽¹²⁾. 대부분의 열감지 인광체 연구들은 대기환경에서 대표적인 수용성 결합제 (HPC, ZYP coatings Inc., Oak Ridge, USA)가 사용되거나^[10,13], PDMS와 결합하여 두꺼운 필름 형태로 제작되어 사용되어 왔다⁽¹⁴⁾. HPC결합제를 사용하는 경우 열경화를 통해 일정 강도를 가질 수 있지만 대부분 작은 외력에도 쉽게 파손될 수 있다. PDMS를 사용하는 경우, 틀에 부어 주조하는 방식으로 두께에 따라 경화 시간이 크게 소요된다. 또한, PDMS로 도포된 인광체는 필름 형식으로 많이 사용되었으며, 경화된 후 고체 표면에 접착이 어렵다.

본 연구에서는 열감지 인광체 MFG와 비 수

용성 PDMS를 사용하여 복잡한 곡면 형상의 표면에도 쉽게 코팅할 수 있는 압축공기 스프레이 기법을 사용하여 대상의 표면에 코팅을 하고, 대기 환경과 물 속에서의 인광체의 인광수명을 각 온도에 따라 비교하고, 물 속의 고온 표면 온도장을 인광수명법을 통해 측정하는 방법을 제안하고 코팅된 시편의 두께와 환경에 따른 결과를 비교하고자 한다.

2. 연구 이론 및 방법

2.1 인광수명법

열화상 인광체는 온도에 따라 다른 많은 반응 특성을 가지고 있다. 강도비율과 인광수명법은 일반적으로 열화상의 인광 온도계에 사용된다. 시간에 따른 인광 신호를 기반으로 일시적 신호를 사용한 수명 분석방법은 다음과 같다⁽⁴⁾.

$$V(t) = Ae^{-t/\tau} + b + \varepsilon(t) \quad (1)$$

여기서, $V(t)$ 은 인광신호와 모든 노이즈를 포함한 광신호이며, A 와 b 는 초기 강도와 베이스라인 오프셋이다. τ 와 t 는 각각 인광수명(lifetime)과 시간이고, $\varepsilon(t)$ 는 샷노이즈, 양자화 노이즈 및 백그라운드 방사선에 의해 생성된 노이즈이다. 반복적인 실험을 평균하여 노이즈항 $\varepsilon(t)$ 를 줄일 수 있다. 베이스라인 오프셋(b)이 주어진다면 위 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I(t) = Ae^{-t/\tau} \quad (2)$$

여기서, $I(t)$ 는 인광강도이며, $I(t) = V(t) - b$ 이다. 초기 강도 I_0 로 나눈 $I(t)$ 로 얻은 정규화된 강도는 불균일한 광원, 인광체 농도와 같은 일부 오류 조건을 제거할 수 있다.

$$\frac{I(t)}{I_0} = A'e^{-t/\tau} \quad (3)$$

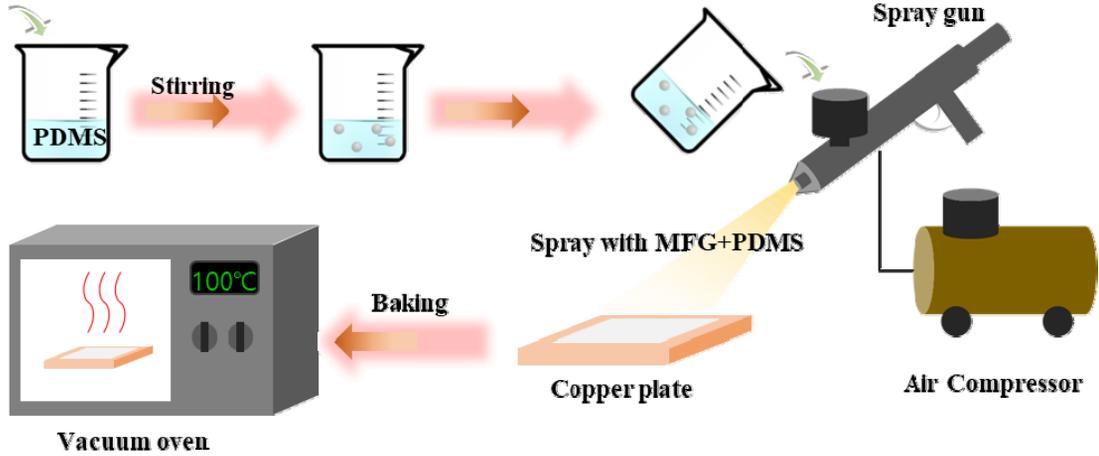
● Mg₄FGeO₆:Mn

Fig. 1. Schematic of coating process

인광 수명은 비선형 최소 제곱근 근사 알고리즘을 사용하여 위 식을 만족한다. 식 (3)에서 확인할 수 있듯이, 인광 수명시간은 $I(t)$ 와 I_0 의 비와의 관계를 갖는다. 본 연구에서는 각 시편과 각 온도에서 측정된 인광강도를 통해 인광 수명시간을 구하고, 온도에 따른 인광 수명시간의 변화를 이용하여 PDMS의 두께에 따른 영향을 확인하였다. 또한 실제 켈칭 시의 인광이미지를 통하여 얻어진 인광 수명시간을 통해 온도장을 계산하였다.

2.2 MFG(Mg₄FGeO₆:Mn⁴⁺) 특성

MFG는 열감지인광체의 하나로써 13~1000 K 까지 넓은 범위의 온도 측정이 가능하다. 망간 이온이 자외선 파장대 (385 nm)의 빛을 흡수하여, 650 nm 영역대의 인광을 발현한다⁽¹⁵⁾.

Brübach 연구 그룹은 MFG를 이용한 온도장 측정의 정확도 분석을 위해 인광체의 농도, 광원의 세기, 압력의 영향 등에 대한 인광학적 특성을 분석하였다⁽¹⁶⁾. 그들의 연구결과에 따르면 인광체의 농도 및 열처리에 의한 측정 오차는 실험에서 같은 인광체를 사용하고 1000 K 이상의 환경이 아니면 무시할 수 있다. 본 연구에서 적용된 실험장치에서 같은 MFG에 보정실험 및 켈

칭실험을 수행하였고, 온도 범위가 600 K 이하에서 수행되었기 때문에 MFG의 특성에 의한 오차는 무시할 수 있는 수준이다.

2.3 열감지 인광체 코팅방법

본 연구에서 사용된 코팅시편은 물 속에서의 보정실험을 위한 구리평판 4개와 켈칭 실험을 위한 카트리지 실린더 히터의 표면 위에 제작되었다. Fig. 1에는 코팅과정의 구성도가 나타나있다. MFG와 PDMS(RTV-3140, Dow corning)을 1:3의 질량비율로 혼합하여 압축 공기 스프레이 시스템을 3 mm 두께의 구리 평판과 지름 6 mm, 높이 100 mm의 실린더 히터 표면에 분사하여 코팅하였다. 압축 공기 스프레이 시스템 사용시, PDMS의 높은 점도를 톨루엔 용액과 1:1의 질량비율로 혼합하여 충분히 팽윤 시킨 후 스프레이 분사량을 균일하게 유지하도록 하였다. 각기 다른 스프레이 분사 횟수를 통해 4개의 서로 다른 두께를 가지는 코팅시편을 제작하였다. 코팅이 완료된 후 각 시편은 클린룸에서 1시간 건조시킨 후, 진공 오븐을 이용하여 100°C에서 1시간동안 PDMS 경화와 톨루엔을 완전 기화시켰다. Fig. 2와 같이 구리 평판의 코팅 영역은 30 mm × 30 mm의 구리 평판에 취급을 위한 좌우

Table 1. Thickness of specimens

Specimens	Thickness
PDMS-80 (80 times sprays)	30.2 $\mu\text{m} \pm 6 \mu\text{m}$
PDMS-160 (160 times sprays)	53.75 $\mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$
PDMS-240 (240 times sprays)	62.5 $\mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$
PDMS-320 (320 times sprays)	97.5 $\mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$

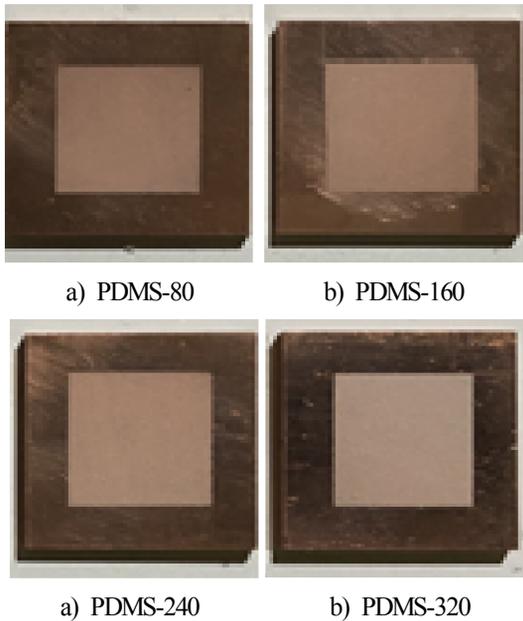


Fig. 2. Calibration setup in air with PMT Photo of Specimens, a) PDMS-80 b) PDMS-160 c) PDMS-240 d) PDMS-320

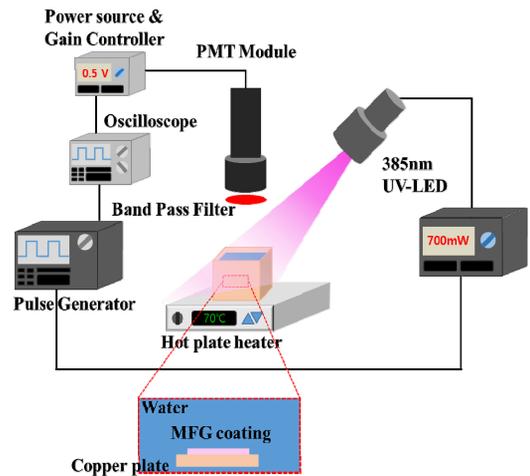
5 mm의 여 유를 제외한 20 mm × 20 mm 이다. 구리 평판 위MFG와PDMS로 코팅된 각 시편의 두께를

측정하고자 Alpha-step D-500 (KLA-Tencor)를 사용하여 측정하였고, 스프레이 횟수에 따른 시편의 두께는 Table 1에 나타나있다. 스프레이 과정 시, 압축기의 압력은 5 ~ 8 bar로 분사 압력이 일정하게 유지되지 못하였으므로, 일정 분사 횟수에도 불구하고 각 시편의 두께가 선형적으로 증가하지 않는 결과를 나타냈다.

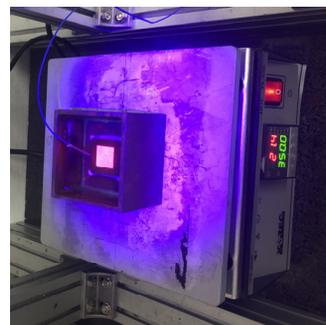
2.4 실험장치 및 방법

2.4.1 보정 실험

Fig. 3 (a)는 실험장치의 구성도이고, (b)는 실제 구리 챔버 내부에 PDMS-320 시편의 인광모습이다. 보정 실험을 위해 온도 조절이 가능한 핫플레이트를 사용하고, k 형 열전대를 이용하여 각 시편의 온도를 확인하였다. 대기에서의 보정 실험 시, 핫플레이트 위에 각 구리 시편을 동일한 위치에 설치하였다. 물 속에서의 실험을 하기 위해 100 mm × 100 mm × 100 mm의 크기로 제작된 구리 챔버 내에 바닥으로부터80 mm높이의 물을 채워 넣고, 핫플레이트의 직접적인 온도 전달을 최소화하고자 테프론 지지대를 사용하여



a) Schematic of calibration setup



b) Photo of setup with PDMS-320

Fig. 3. Calibration setup in air with PMT

시편을 바닥으로부터 50 mm 높이로 고정하였다. MFG를 여기 시키기 위해 900 mW의 UV-LED (385 nm)가 사용되었으며, 50 ms 지속 시간과 50 ms의 지연 시간의 펄스로 시편에 조사되었다. MFG에서 발생하는 인광을 외부 노이즈에 의한 오류를 최소화하기 위해서 band pass filter (650 nm, Edmund optics)를 설치하여, 광전증폭관 (photomultiplier tube, H10722-110Y003, 10MHz, Hamamatsu)을 통해 25,000Hz의 인광강도 데이터를 획득하였으며, 오실로스코프를 통하여 UV-LED의 펄스와 광전증폭관으로부터 얻어진 데이터를 동시에 획득하였다. 얻어진 인광강도 데이터로부터 UV-LED가 꺼지고 난 이후의 인광강도를 분석하여 식 (3)을 사용하여 인광수명을 계산하였다.

2.4.2 퀘칭에 의한 냉각실험

MFG와 PDMS로 혼합된 용액을 실린더 카트리지 히터 표면에 2.3 절의 코팅방법과 동일하게 제작하였다. Fig. 4와 같이 실린더 형상의 이 미지 왜곡을 최소화하기 위해 이중 탱크를 디자인하여 코팅된 실린더가 퀘칭되는 내부 탱크에 2 m/s의 속도로 물이 10 mm 파이프를 지나 유입되게 하여 물의 온도 증가로 인한 퀘칭 효과 감소를 최소화 할 수 있게 하였다. MFG를 인광시키기 위한 광원 및 여기 시간은 2.4.1항과 동일하게 UV-LED를 사용하였고, 각각이 50ms의 펄스로 여기 및 지연시간을 가지고 시편에 조사되었다. 인광체가 코팅된 실린더 표면의 2D 온도장을 획득하기 위하여 high speed camera와 2.4.1항과 동일한 band pass filter를 촬영된 이미

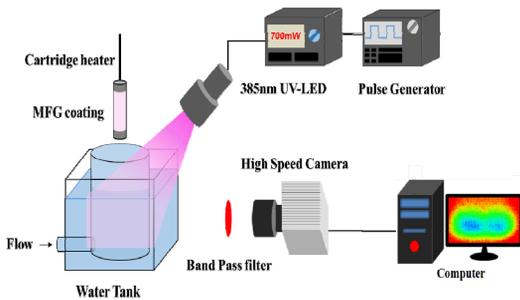


Fig. 4. Schematic of quenching experiment setup

지 중 UV-LED 가 꺼 지고 난 이후의 인광 이미지를 분석하여 각각의 픽셀에서의 인광수명을 획득하였다. 획득된 인광수명을 실린더의 보정 데이터를 활용하여 온도로 치환해 준다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 보정 실험 결과

온도수명을 온도 값으로 보정해 주기 위한 보정데이터를 구하기 위해 상온에서부터 250°C 사이의 6개 지점에서 보정실험을 수행하였다. 또한 대기환경과 물 속에서의 각 시편의 인광수명을 비교하고자 상온에서부터 70°C 사이의 5개 지점

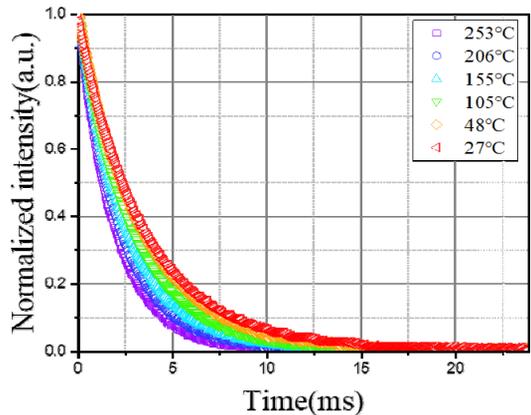


Fig. 5. Decay region of PDMS-320 with different temperature

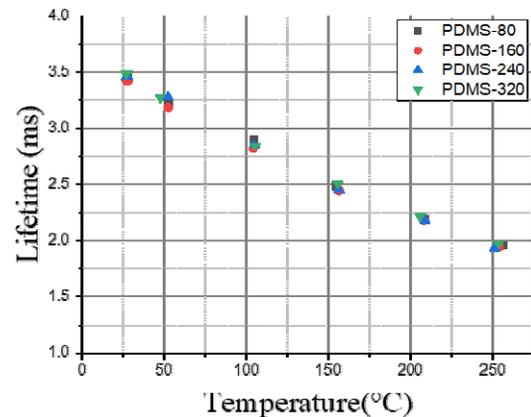
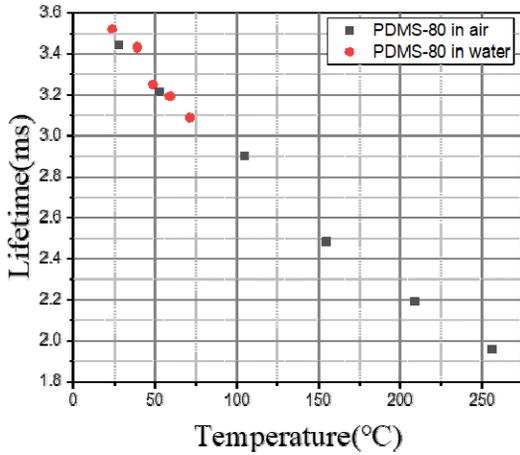
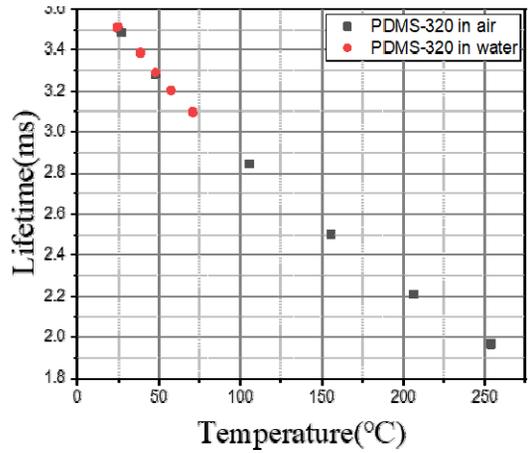


Fig. 6. Lifetime calibration data with different thickness specimens in air

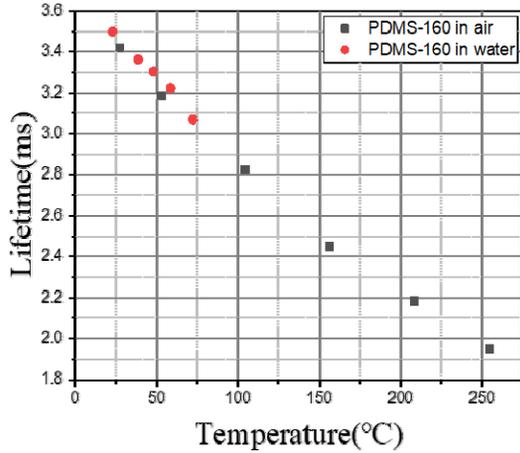


(a) PDMS-80 in air and water

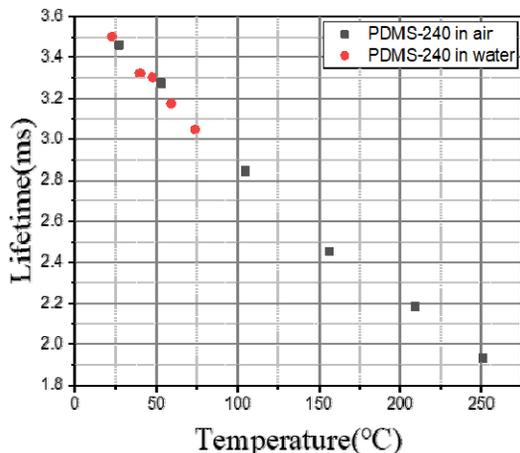


(d) PDMS-320 in air and water

Fig. 7. Lifetime calibration data in air and water



(b) PDMS-160 in air and water



(c) PDMS-240 in air and water

에서 보정실험을 수행하여 각 인광수명을 비교 하였다. Fig. 5는 대기환경에서 수행된 PDMS-320 시편의 온도에 따른 인광감쇠곡선이다. 온도가 높아짐에 따라 감쇄기울기가 급해지는 것을 확인하였고, Fig. 6에 나타난 인광수명시간은 fig. 5로부터 계산되었으며, 식 (3)을 시간에 따른 평균화된 강도에 커브 피팅하여 인광수명을 획득 하였다. 두께가 서로 다른 코팅 시편을 동일한 조건에서 보정실험하여 얻어진 온도에 따른 인광수명이 Fig. 6에 나타나있다. 결과와 같이 서로 다른 두께를 가지고는 시편들은 일정한 인광수명을 나타내며, 인광수명은 코팅된 시편의 두께에 영향을 받지 않음을 확인하였다.

Fig. 7는 각 시편의 대기에서의 인광수명과 물속에서의 인광수명을 나타내고 있다. 모든 시편은 오차 범위 내에 일치함을 확인 할 수 있다. 따라서, 열감지 인광체를 이용한 온도측정기법 사용시, 인광수명법을 통한 온도해석은 인광체 주변의 환경에 영향을 받지 않으며, 일정 두께 이상일 때, 표면 조도나 그의 두께에 따른 인광수명은 달라지지 않는다.

3.2 쉘칭에 의한 냉각 실험

230°C로 가열된 실린더는 냉각 탱크로 수직으로 떨어지게 하여, 냉각 탱크에 충분히 담긴

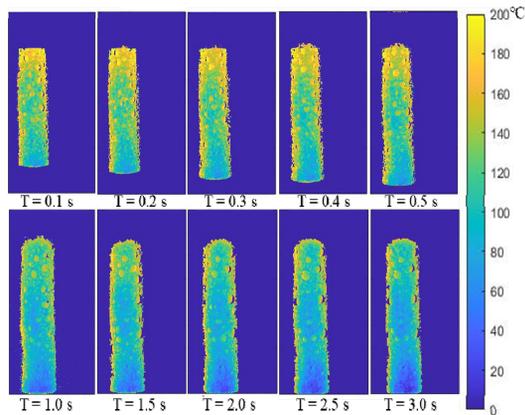


Fig. 8. Instantaneous 2D temperature field of cartridge heater

시점부터 상온의 물에 의한 퀘칭되어 실린더 표면의 온도변화를 열감지 인광체와 인광수명법을 이용하여 측정하였으며 촬영 시작 후 총 3.5초간 0.1초 간격으로 온도장을 측정하였다. Fig. 8은 각기 다른 시간의 실린더 표면의 온도를 나타낸다. 촬영 후 0.1초 시점에서 상부는 160°C 근처이고, 하부는 약 80°C 수준이다. 촬영 전 코팅된 실린더가 냉각 탱크로 이동하면서 하부부터 퀘칭되어 상부와 하부의 온도가 차이 나는 것을 확인할 수 있다. 이후, 시간에 따라서 전체 실린더의 온도는 시간에 따라 퀘칭되는 것을 확인할 수 있으며, 3초 후 하부가 상온에 근처까지 떨어지는 것을 확인할 수 있고, 상부는 100°C 근처로 확인되었다. 또한 각 온도장 이미지에서 실린더 주변의 물이 비등하면서 발생한 수증기 기포에 의해 퀘칭이 불균일하게 일어나 온도장이 불균일하게 일어난 것을 이미지에서 확인할 수 있다. 인광수명법은 해당되는 인광체의 온도에 따른 인광수명의 보정 데이터를 활용하여 인광수명을 온도로 치환하는 방법으로 온도 측정에 대한 오차를 최소화 할 수 있다.

4. 결론

열감지 인광체와 PDMS를 혼합하여 코팅된 시편을 이용하여 대기환경과 물 속에서의 온도에 따른 인광체의 인광수명을 비교하였다. 코팅

시편의 두께와 상관없이 인광수명은 비슷한 값을 가지며, 대기환경과 물 속에서도 인광수명의 특성은 달라지지 않음을 확인하였다.

압축공기 스프레이를 통해 실린더의 표면에도 쉽게 코팅하여 UV-LED와 인광수명법으로 빠르게 냉각되는 실린더의 온도장 변화를 0.1초 간격으로 추출하였다. 본 연구에서 개발한 측정기술은 물 속에 잠긴 고온물체의 표면 온도측정에 적용할 수 있다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020R1A5A8018822, NRF-2019H1D3A1A01071033).

REFERENCE

- 1) I. Mizikar : Iron and Steel Engineer (1970) 53.
- 2) N. Hatta, J. Kokado, K. Hanasaki, H. Takuda, and M. Nakazawa : Tetsu-to-Hagane, 68 (1982).
- 3) Hyungdae Kim, Gregory DeWitt, Thomas McKrell, Jacopo Buongiorno, Lin-wen Hu, On the quenching of steel and zircaloy spheres in water-based nanofluids with alumina, silica and diamond nanoparticles, International Journal of Multiphase Flow 35 (2009) 427-438.
- 4) Seung Jae Yi, Kyung Chun Kim, Phosphorescence-based multiphysics visualization: a review, Journal of Visualization (2014) 17:253-273.
- 5) B.M. Luther, K.M. Tracy, M. Gerrity, S. Brown, A.T. Krummel, 2D IR spectroscopy at 100 kHz utilizing a Mid-IR OPCPA laser source, Optics express, 24(4) (2016) 4117-4127.
- 6) Ian Sage, Thermochromic liquid crystals, Liquid Crystals, 38 (2011) 1551-1561.
- 7) J. Brübach, J. Feist, A. Dreizler, Characterization of manganese-activated magnesium fluorogermanate with regards to thermographic phosphor thermometry, Measurement Science and Technology, 19(2)

- (2008) 025602.
- 8) S. Someya, M. Uchida, K. Tominaga, H. Terunuma, Y. Li, K. Okamoto, Lifetime-based phosphor thermometry of an optical engine using a high-speed CMOS camera, *International journal of heat and mass transfer*, 54(17-18) (2011) 3927-3932.
 - 9) N. Fuhrmann, M. Schild, D. Bensing, S. Kaiser, C. Schulz, J. Brübach, A. Dreizler, Two-dimensional cycle-resolved exhaust valve temperature measurements in an optically accessible internal combustion engine using thermographic phosphors, *Applied Physics B*, 106(4) (2012) 945-951.
 - 10) Y. Xu, C. Moon, J.-J. Wang, O.G. Penyazkov, K.C. Kim, An experimental study on the flow and heat transfer of an impinging synthetic jet, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 144 (2019) 118626.
 - 11) A. Omrane, F. Ossler, M. Aldén, Two-dimensional surface temperature measurements of burning materials, *Proceedings of the Combustion Institute*, 29(2) (2002) 2653-2659.
 - 12) S.M. Goedeke, W.A. Hollerman, N.P. Bergeron, S.W. Allison, M.R. Cates, T.J. Bencic, C.R. Mercer, J.I. Eldridge, Study of Resbond® Ceramic Binders Used for High Temperature Non-Contact Thermometry, *Advances in Photonic Materials and Devices*, Volume 163.
 - 13) Tao Cai, Di Peng, Ying Zheng Liu, Xiao Feng Zhao, Kyung Chun Kim, A novel lifetime-based phosphor thermography using three-gate scheme and a low frame-rate camera, *Experimental Thermal and Fluid Science* 80 (2017) 53–60.
 - 14) Katherine E. Mitchell, Victor Gardner, Stephen W. Allison, Firouzeh Sabri, Synthesis and characterization of flexible thermographic phosphor temperature sensors, *Optical Materials* 60 (2016) 50-56.
 - 15) G. Blasse and B. Grabmaier, *Luminescent materials* vol. 44: Springer-Verlag Berlin, 1994.
 - 16) J. Brubach, J. P. Feist, and A. Dreizler, 2008, "Characterization of manganese-activated magnesium fluorogermanate with regards to thermographic phosphor thermometry," *Measurement Science & Technology*, vol. 19, p.025602.