

온도감응형 인광물질을 이용한 온도장 및 열변형 동시 계측 기법 개발

임유진* · 엄은섭†

Development of a multi-sensing technique for temperature and strain field of high-temperature using thermographic phosphors

Yujin Im* and Eunseop Yeom†

Abstract Solid oxide fuel cell (SOFC) operates at high temperatures in range of 600-800°C. Since layers of SOFC are composed of different substances, different thermal expansion in SOFC can result in defects under high temperature conditions. For understanding relation between temperature field and the thermal deformation in SOFC, temperature and strain field were simultaneously estimated using thermographic phosphors by optical measurement. Temperature fields were obtained by the life-time method, and the temperature differences of one specimen was checked with thermocouple. The thermal deformation was estimated by digital image correlation (DIC) method with extracted phosphorescence images. To investigate the deformation accuracy of DIC measurement, thermographic phosphors were coated with and without grid pattern on aluminum surface. Simultaneous measurement of temperature fields and thermal deformation were carried out for YSZ. This study will be helpful to multi-sensing of temperature field and thermal deformation on SOFC cells.

Key Words : Phosphorescence (인광), multi-sensing (동시 계측), SOFC (고체 산화물 연료전지)

1. 서론

고체산화물 연료전지 (Solid Dioxide Fuel Cell, SOFC)는 화학적 에너지를 통해 전기에너지를 생산하는 연료전지 중 하나이다. 타 연료전지와 다르게, 전해질로 고체 전해질을 사용하여 별도의 금속 촉매 없이 이온을 전도시키는 특징을 가진다.

SOFC는 기본 단위체에 해당하는 cell로 구성되며, 이 여러 cell을 직렬로 연결하여 더 높은 전력을 생산하기 위한 집합체 stack을 구성한다. 단위체인 cell은 크게 양극, 음극, 전해질, 그리고 연료 및 공기의 유로와 타 cell과 연결을 위한 분리판으로 구성된다. 셀 내부의 각 층은 YSZ, LSM, Ni, SUS 등의 서로 다른 물질로 이루어져 있다. SOFC는 다른 연료전지에 비하여 높은 70~80%의 효율을 가지고 다양한 연료의 사용이 가능하기 때문에 상용화 및 범용화를 위해 활발한 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁾ SOFC는 이온 전도 및 전극 활성화를 위해 600°C~800°C의 고온이 유지되는 hot box에서 작

† School of Mechanical Engineering, Pusan National University (PNU), Associate Professor
E-mail: esyeom@pusan.ac.krE-mail:

* School of Mechanical Engineering, PNU,
MS student

동하며, 최고 1000°C 온도를 형성한다. 따라서 cell 내 각 물질의 열팽창 계수 차이로 인한 기계적 변형 및 크랙 등 결함, 열화 현상으로 인하여 성능이 저하될 수 있다.⁽²⁾

한편, 인광물질은 여기광이 조성된 후, 안정화 되는 과정에서 여타 물질에 비하여 길고 독립적인 빛(인광)을 방출한다. 이러한 인광정도는 온도, 압력, 응력 등의 물질의 조건에 따라 다른 특성을 보이는데, 이를 이용하여 온도, 압력, 응력의 계측 시도가 이루어지고 있다.⁽³⁾ 인광 계측 기법은 기존 센서와 달리, 비접촉 광학 기반 측정이며 고속의 측정이 가능하다는 장점이 있다.

기존의 SOFC의 온도 분포 및 변형에 대한 연구는 계측 기법의 한계로 인하여 대부분 시뮬레이션을 기반으로 수행되었다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 인광 계측 기법에 영상처리를 통해 온도장과 열변형장을 동시에 측정하려 한다. 이를 위해 인광물질을 격자 패턴을 가지도록 알루미늄 표면에 코팅하고 격자가 없는 경우와 결과를 비교하였다. 그 후, SOFC 내부 계층 중 하나인 YSZ 전해질 층에 대한 온도장과 열변형장을 측정하였다.

2. 연구 방법

2.1 인광 계측법

인광 계측법은 인광물질(phosphor)이 방출하는 독립적이고 긴 빛을 분석하여 온도, 압력, 응력 등의 데이터를 획득하는 방법이다. 각 파라미터별로 사용 가능한 인광물질들은 각기 다른 발광 메커니즘을 가지며, 사용되는 분석 방법의 종류 역시 여러 가지가 있다.

2.1.1 인광 수명법

온도감응형 인광물질은 여러 인광 물질 중 발광 특성이 온도 환경에 따라 달라지는 것들을 칭한다. 이 방법은 주로 두 가지의 분석 기법이 사용된다. 첫 번째로는 온도가 높아질수록 인광의 강도가 강해지는 특성을 이용하는 방법인 강도비율법이 있다. 온도에 상관없이 일정한 강도를 가지는 파장대

의 기준 인광 강도에 대한 특정 온도에서의 인광 강도비를 계산하여 온도값을 구하는 방법이다. 두 번째로는 인광의 소광 주기를 계산하여 온도값을 구하는 수명주기 방법이 있다. 온도감응형 인광물질 중 일부는 온도가 높아질수록 강도는 증가하고 수명주기는 짧아지는 특징이 있다.⁽⁵⁾ 이러한 특징을 이용하면 인광신호를 분석하여 온도를 알아낼 수 있는데, 본 연구에서는 인광 신호를 통해 온도를 산출하기 위해 수명주기법을 적용하였다. 온도감응형 인광물질을 강한 자외선으로 여기시켜주면 전자의 에너지가 상승하여 활성상태가 되고, 이후 안정화 되는 과정에서 빛을 방출한다. 이러한 온도감응형 인광물질의 인광강도($I(t)$)와 수명주기(τ)의 관계식은 아래 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾ 시간(t)이 지남에 따라 지수함수형태로 광량이 감소하여 여기되지 않았던 초기 인광강도(I_0)에 도달한다.

$$I(t) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + b \quad (1)$$

인광 이미지의 인광 강도 값의 시간에 대한 변화를 matlab 프로그램을 활용한 비선형 최소 제곱근 근사 피팅하여 수명주기를 얻었다. 각 픽셀에 해당하는 영역의 수명주기를 계산하여 전체 온도장 결과를 획득할 수 있도록 했다.

2.1.2 열감지 인광체 MFG

온도감응형 인광물질은 합성되는 원소들의 종류와 그 비율에 따라 각기 다른 특성을 가진다. MFG(Mn : Mg₄FGeO₆)는 열감지 인광체 중의 하나로 13~1000 K의 넓은 온도 측정 범위를 가지며, 도핑되는 망간 이온이 자외선(365nm)의 파장대 빛을 흡수한 뒤 650nm의 파장대 빛을 방출하는 특성을 가지는 인광물질이다.

SOFC의 작동 환경을 포함하는 온도 범위와 안정성을 고려하여, 본 연구에서는 MFG를 열감지 인광체로 선정하여 사용하였다.

2.2 열변형 계측법

2.2.1 열변형과 열응력

물체에 온도 변화나 구배가 생기면, 분자 운동 상태가 달라짐에 의해 물체는 팽창 혹은 수축하려는 특징을 가진다. 기준 시점에 대하여 특정 시점에서 온도가 증가하였을 경우에는 열팽창이, 온도가 감소하였을 경우에는 열수축이 발생한다. 또, 온도 차이(ΔT)가 형성되었을 경우에는 온도 구배에 의하여 내부 열응력(σ)이 형성된다.

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3)$$

위 식에서 ε , α , E 는 각각 변형률, 열 팽창계수, 탄성 계수를 나타낸다. SOFC는 정지 상태에서는 상온(약 25°C)의 온도를 가지고, 작동을 시작하게 되면 서서히 그 온도가 증가해 600°C이상의 고온을 유지하다가, 작동을 중지하면 다시 상온으로 서서히 식는 과정을 거친다. 이 과정에서 열변형과 열응력이 발생할 수 있기 때문에 온도와 변형을 동시에 측정할 수 있어야 한다. 큰 열팽창계수를 가지는 알루미늄 시편을 대상으로 하여 열변형 계측 유효성을 입증하고자 하였다. 그 후 SOFC의 전해질로 사용되는 YSZ 시편의 온도 및 변형장을 측정하였다.

2.2.2 Digital image correlation

Digital image correlation(DIC) 기법은 재료의 변형을 관찰하고 측정하기 위해 널리 사용되는 기법이다. 카메라로 물체를 촬영하고, 변형 전과 변형 후 이미지 비교를 통해 각 요소의 이동량을 추정한다. 그 후, 추정된 이동량을 통해 변형률을 계산하는 방법이다.⁽⁷⁾ 일반적으로 DIC는 시편에 speckle 모양을 가지도록 코팅하여 랜덤한 얼룩무늬를 띄게 하여 요소의 이동을 추적하기 용이하게 한다. 본 연구에서는 식(4)와 같이 요소 간의 차이를 나타내는 zero-normalized sum of squared differences (ZNSSD) coefficient(C_{ZNSSD})가 최소가 되는 위치를 찾아 변형률을 계산하였다.

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i,j} \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2 \quad (4)$$

여기서 f_m 과 g_m 은 각각 변형 전과 후의 subset intensity 평균을 의미하며, Δf 와 Δg 는 각 위치별로 평균과의 차를 제공해 더한 것의 제곱근을 의미한다. 이렇게 추정된 이동량을 기존의 거리로 나누어 변형률을 구하였다.

2.3 실험 장치 및 방법

2.3.1 시편 제작 및 코팅

MFG 인광물질을 표면에 원활하게 도포하고 고정할 수 있도록 HPC binder (ZYP coatings Inc., Oak Ridge, USA)를 MFG와 3:1의 비율로 혼합하였다. 시편은 SOFC의 전해질층으로 사용되는 YSZ, 큰 열팽창계수를 가지는 알루미늄을 사용했으며 모두 100mm×100mm 사이즈로 제작했다. 시편의 표면에는 1.4mm×1.4mm 크기의 격자 패턴을 만들 수 있도록 표준체 호칭 14를 이용하여 코팅했다 (Fig. 1). MFG와 HPC binder 혼합액은 에어브러쉬로 5-8 bar 압력으로 플레이트 표면에 분사하였고, 상온에서 2시간 건조 후 진공 오븐에서 200°C조건으로 2시간 열처리하여 기포를 제거하고 경화시켰다.

2.3.2 보정 실험

인광물질을 사용하여 온도장을 계측하기 위해서는 각 인광물질의 수명주기가 어떤 온도 값을 나타내는지 알아내기 위해 Fig. 2와 같이 셋업하여

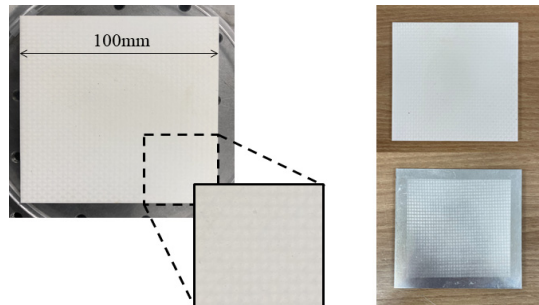


Fig. 1. Grid pattern coating (left) and YSZ, aluminum specimens (right).

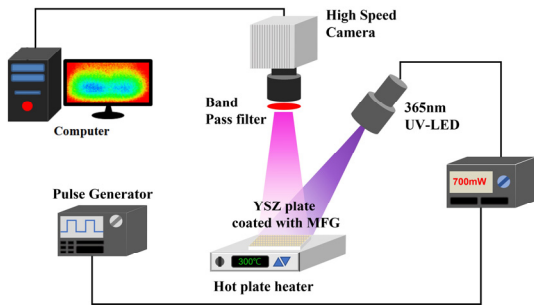


Fig. 2. Experiment setup.

보정 실험을 진행했다. 보정 실험은 상온(25°C), 100°C, 200°C, 300°C 온도 구간을 나누어 진행했으며, 각 온도에서 적외선 온도계의 온도값을 측정하여 실제 온도를 구했다. 주어진 온도값에 대한 수명주기를 구하여 온도-수명주기 상관식을 얻을 수 있도록 했다.

2.3.3 본 실험 및 데이터 획득

실제 SOFC의 평균적인 작동 온도는 600~800°C 이지만, 본 연구에서는 측정 기법 개발을 목적으로 plate heater를 열원으로 사용하여 300°C의 온도장을 상온(25°C)과 비교하였다. 또한, 열전대를 사용하여 시편의 격자 패턴 코팅에 따른 표면 온도를 측정하여 인광물질 코팅에 의한 온도 변화를 확인할 수 있도록 했다. 인광물질 여기를 위한 광원 UV-LED(Mightech, 365nm)는 50ms의 지속 시간과 50ms의 지연 시간을 가지도록 10Hz 펄스를 주었다. 초고속 카메라는 10,000 fps 설정하여 1초에 10번의 주기를 저장할 수 있도록 했다. 카메라 렌즈 전면에서 655nm±50nm의 band pass filter(Edmund Optics)를 장착하여 MFG의 인광을 제외한 외부 광원에 의한 영향을 최소화하도록 했으며, 이미지의 resolution은 125 μm/pixel 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 변형장

3.1.1 격자 패턴에 따른 변형장 정확도

촬영된 300°C 인광 이미지를 상온의 이미지와

비교하여 이동량을 계산했다. 각 이미지는 광원에 의해 여기된 후의 peak점에서 추출했다. 25 pixel radius를 가지는 하부요소(subset)를 구성하고, ZNSSD 계산을 통해 최소한의 차이를 가지는 요소를 찾아 0.01 pixel (1.25μm) resolution으로 이동량을 계산했다. 격자 패턴의 변형장 계측 유효성을 판단하기 위해 격자가 있는 코팅 시편과 격자 없이 코팅된 시편의 이미지로 DIC 연산을 수행하였다 (Fig. 3). 결과를 비교했을 때, 격자 패턴이 없는

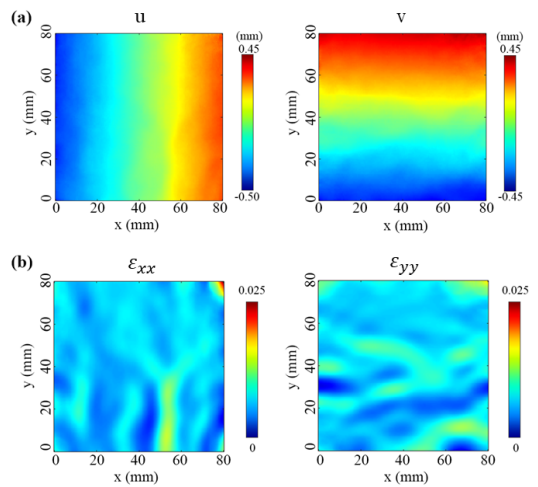


Fig. 3. (a) u and v displacement and (b) ϵ_{xx} and ϵ_{yy} of aluminum specimen coated with grid pattern.

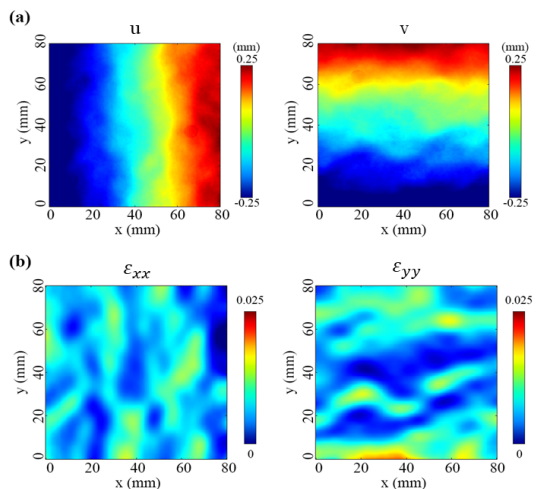


Fig. 4. (a) u and v displacement and (b) ϵ_{xx} and ϵ_{yy} of aluminum specimen coated without grid pattern.

시편에서 subset 내부의 일치도를 파악하기 어려워 요소의 추적이 부적합하였다. 따라서 인접한 subset 간에 이동량의 편차가 크게 계산되어 불균일한 이동이 나타났으며 변형장의 경우에도 더 큰 편차를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 격자 유무에 따른 DIC 결과를 Table 1에 비교하였다. DIC 이미지 처리에서 각 하부 요소의 불일치도를 나타내어 적합하게 연산의 적합성을 보여주는 파라미터로 ZNSSD coefficient가 있다.⁽⁸⁾ 이 차이가 줄어들수록 정확도가 올라가며, 격자패턴이 있을 때 0에 가까운 0.074로 적절하게 추적되었음을 알 수 있다. 그리드가 없는 경우 0.389의 비교적 높은 값을 가져 낮은 신뢰도의 변형 데이터가 획득됨을 확인했다.

Table 1. DIC parameter depending on grid pattern.

	Grid	No grid
ZNSSD coefficient	0.074 (±0.088)	0.389 (±0.094)
Strain	0.083 (±0.015)	0.082 (±0.029)

따라서 이는 그리드 패턴에 의하여 각 지점의 이동 및 변형을 더 적절하게 연산할 수 있음을 보여준다. 단, ZNSSD coefficient의 경우에 관심 영역의 선정, 하부 요소의 크기 및 전체 이미지 품질에 영향을 받을 수 있다. 또한, 시편에 대한 격자의 상대적인 크기가 너무 클 경우 subset에서 일치도를 판단하기 어려울 수 있고, 그 크기가 작을 경우에는 subset 해상도의 한계가 생길 수 있다. 더 정확한 비교를 위해서는 각 파라미터별로 실험 및 데이터 분석을 진행하여 최적 격자 패턴 및 코딩 방법과 처리 과정의 연구가 추가로 필요하다.

3.1.2 재료별 변형장 계측 결과

Fig. 5는 YSZ 시편의 이동량과 변형률을 보여준다. 구속 조건이 없는 자유 팽창 조건으로 실험을 진행하여 데이터를 획득함에 따라, 시편의 중심에서부터 가장자리 방향으로 열팽창이 진행되었음을 확인할 수 있고, 이미지상의 양 끝단에서 이동량 최대/최소값을 가진다. 알루미늄과 YSZ 시편을 비교하였을 때, 용융으로 제작되는 알루미늄과 압축으로 제작되는 YSZ의 공정상 특징에 의하여 이

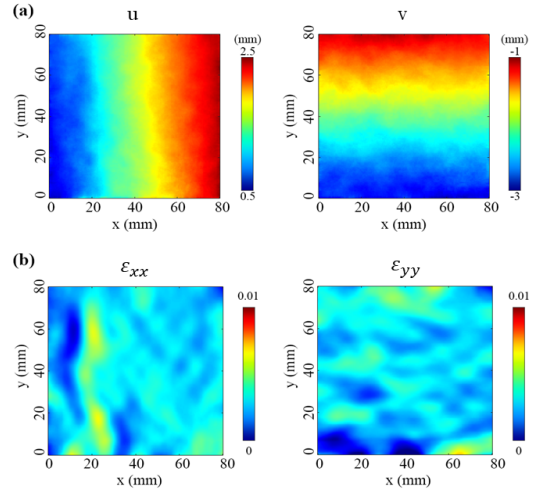


Fig. 5. (a) u and v displacement and (b) ϵ_{xx} and ϵ_{yy} of YSZ specimen.

Table 2. Average of strain and comparison with theoretical value at 300°C.

	Measured value		Theoretical value
	$\epsilon_{x,x}$	$\epsilon_{y,y}$	ϵ
Aluminum	0.82%	0.84%	0.76%
YSZ	0.35%	0.34%	0.31%

동량의 추세가 YSZ에서 더 불균일하게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 YSZ 고열압축과정에서 응집되는 YSZ 입자 알갱이와 공극률의 분포가 각 지점마다 다르게 형성되기 때문이다. 따라서 YSZ와 같이 열변형률이 적은 시편을 대상으로 변형장을 추적하기 위해서는 더 높은 해상도의 이미지 촬영을 통해 신뢰도를 확보해야 할 것이다.

측정 영역에 대한 이동량 데이터를 기준 거리값으로 나누어 변형률을 계산하고 전체 데이터의 평균값으로 정리하였다 (Table 2). 또한, 25°C에서 300°C온도까지 가열되는 조건에서 각 재료별 물성치 열팽창 계수를 이용하여 이론값을 계산하여 비교하였다. YSZ의 열팽창계수는 $9\sim 11 \times 10^{-6}/K$ 정도로 알루미늄의 열팽창계수인 $23\sim 30 \times 10^{-6}/K$ 에 비하여 2~3배 가량 적은 값을 가진다. 이론값과 실험 데이터의 평균값을 비교하면, 알루미늄 시편의 실험에서 오차가 $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$ 에 대하여 각각 10.5%, 7.9%로 나타났다. YSZ 시편은 $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$ 에 대하여 각

각 12.9%, 9.7%의 오차를 보였다. 이 오차는 시편의 가열 과정에서 온도값이 정확하게 300°C에 도달하지 못한 것에 대한 영향으로 보이며, 이론값에 사용된 재료별 물성치 자체가 본 실험에 사용된 시편의 물성과 완전히 동일하지 않다는 점도 고려할 필요가 있다.

3.2 온도장

3.2.1 보정 실험 결과

각 온도에서 인광이미지를 획득한 후, 수명주기 계산 데이터 처리를 진행하였다 (Fig. 6). 연산에서 노이즈를 제거하기 위해 4×4 window를 사용하여, 수명주기는 0.5mm의 spatial resolution을 가지며,

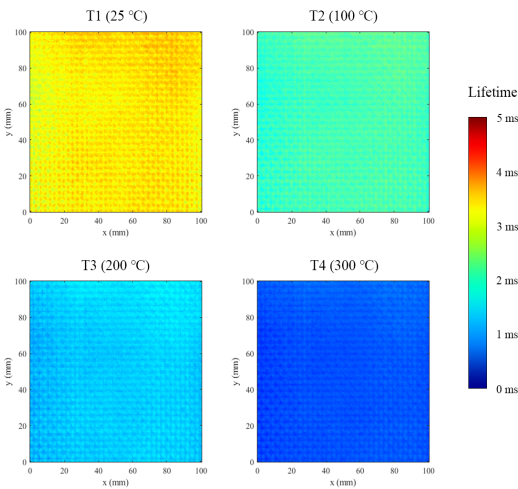


Fig. 6. Lifetime results at each temperature.

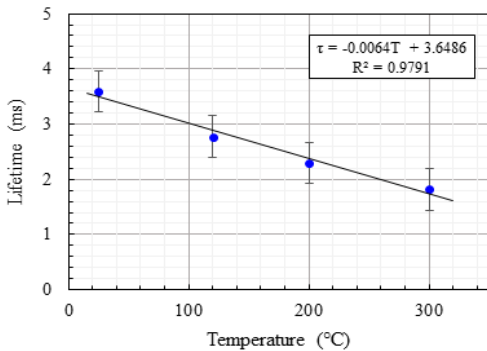


Fig. 7. Calibration curve of temperature-lifetime.

이후 온도장으로 변환한 후에도 동일한 resolution을 가진다. 보정 실험에서 히터의 온도 목표 구간 설정값과 실제 온도 측정값 사이에서 최대 10°C 가량의 차이가 있음을 확인했다. 이 차이는 히터의 온도 조절이 안정상태에 도달하는 과정에서 나타나는 변동에 의해 나타났다. 수명주기의 평균값 데이터를 구한 후, 최소자승법을 활용한 선형 피팅을 통해 온도-수명주기 간의 관계식을 구했으며, 결정계수는 0.9791이다(Fig. 7).

3.2.2 온도장 계측 결과

300°C로 가열 후, 획득한 인광 이미지를 matlab 프로세싱하여 각 픽셀을 수명주기 값으로 변환하였다. 각 픽셀의 수명주기를 보정실험 결과로 획득한 보정곡선에 대입하여 온도장 결과를 획득했다 (Fig. 8). 온도장 이미지 결과에서 대체적으로 300°C 부근의 균일한 온도분포가 형성된 것으로 나타났다. 다만, 이미지 상의 좌측이 우측보다 10°C 가량 높은 온도를 보였다. 이는 첫째로 plate heater 열원을 사용하여 온도를 조정하는 과정에서 plate heater 자체에서 형성되는 약간의 불균일한 온도장의 영향을 받은 것으로 보이며, 둘째로 plate heater 위에 바로 시편을 얹어서 실험을 진행했기 때문에 생긴 불균일한 접촉저항의 영향을 받아 형성된 것으로 보인다. 또한, 격자 패턴 모양 코팅에 의해 열 전달 과정이 달라짐에 따라, 코팅된 부분과 코팅되지 않은 부분의 온도차가 발생했음을 확인할 수 있다. 열전대로 코팅면과 코팅이 없는 부분, 코팅

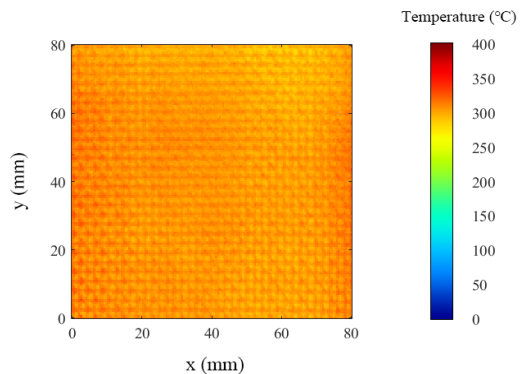


Fig. 8. Temperature field of YSZ specimen.

이 얇게 형성된 부분의 온도를 측정했을 때 각각 다른 온도를 나타냈으며, 크기는 10°C 가량의 온도차가 형성됨을 확인했다. 따라서, 온도장의 검출을 위한 동일한 두께의 고른 코팅법을 제시하는 연구를 추가로 진행해야 할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 고온 환경에서 비접촉 방식으로 온도장 및 변형장을 동일 데이터를 활용해 동시 계측할 수 있는 기법의 개발을 목표로 연구를 진행했다. 인광물질을 코팅하여 물체에 형성된 온도장 데이터를 획득하고, peak점 이미지를 추출하여 해당 온도에서 기존 이미지와의 비교를 통해 변형률 계측 및 변형장 이미지로 재구성 방법을 제안했다.

상온과 300°C에서의 변형을 계산하기 위해 픽셀을 추출하여 요소별 이동 변화를 추적하였다. 온도 감응형 인광물질 MFG를 격자 모양으로 알루미늄 표면에 코팅하고 이를 격자가 없는 경우와 비교하였다. DIC 인자를 비교하여 격자 패턴을 형성한 경우 더 높은 정확도를 보였다. 이론값에 대한 오차는 알루미늄과 YSZ에서 각각 7~11%, 9~13%로 나타났다. 이는 YSZ의 열팽창계수가 YSZ보다 낮고, 따라서 더 높은 해상도로 이미지가 획득될 필요가 있다는 점을 시사한다.

그러나 측정된 온도 분포에서 격자 패턴에 의해 다른 MFG 두께가 불균일한 온도 분포를 형성하는 것을 확인하였다. 이후 연구에서 전체 영역에 대한 변형장과 부분에 이미지로 획득한 온도장 및 변형장의 유효성에 대하여 비교 분석하여 더 나은 이미징 기법을 도출하는 연구를 진행할 예정이다. 또한, 실험 온도는 실제 SOFC 작동 온도보다 낮은 300°C까지의 온도 범위를 다루었기 때문에 온도감응형 인광 물질로 MFG를 사용할 수 있었지만, MFG는 400°C 이상에서 수명주기가 1ms 이하로 감소하여 측정 오차가 커질 수 있다. 따라서 $Y_2O_3:Eu$, $LuPo_4:Eu$ 등의 1000°C 이상의 온도에서 사용 가능한 인광 물질로 변경해야 할 것이다. 본 연구를 통해 인광물질 격자 코팅을 적용하여 온도장과 변형장 동시 계측 기법을 고안했으며, SOFC의 온도장 및 변형장 계측 기반을 마련하였다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1A5A8018822).

REFERENCE

- 1) Ormerod, R. M., 2003, "Solid oxide fuel cells," *Chemical Society Reviews*, Vol. 32, No. 1, pp. 17-28.
- 2) Hanasaki, M., Uryu, C., Daio, T., Kawabata, T., Tachikawa, Y., Lyth, S. M., Shiratori, Y., Taniguchi, S. and Sasaki, K., 2014, "SOFC Durability against Standby and Shutdown Cycling," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 161, No. 9, pp. 850-860.
- 3) Timilsina, S., Kim, J. S., Kim, J. and Kim, G.-W., 2016, "Review of state-of-the-art sensor applications using mechanoluminescence microparticles," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, No. 9, pp. 1237-1247.
- 4) Al-Masri, A., Peksen, M., Blum, L. and Stolten, D., "A 3D CFD model for predicting the temperature distribution in a full scale APU SOFC short stack under transient operating conditions," 2014, *Applied Energy*, Vol. 135, pp. 539-547.
- 5) Khalid, A. H. and Kontis, K., 2008, "Thermographic Phosphors for High Temperature Measurements: Principles, Current State of the Art and Recent Applications," *Sensors*, Vol. 8, No. 9, pp. 5673-5744.
- 6) Cai, T., Kim, D., Kim, M., Liu, Y. Z., and Kim K. C., 2017, "Two-dimensional thermo-graphic phosphor thermometry in a cryogenic environment," *Measurement Science and Technology*, Vol. 28, No. 1.
- 7) J. Blaber et al., 2015, "Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software," *Experimental Mechanics*, Vol. 55, No. 6, pp. 1105-1122.
- 8) Bing Pan et al., 2009, "Two-dimensional digital image correlation for inplane displacement and strain measurement: a review," *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, No. 6