https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.4.323

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Technical Papers

Check for updates

이미지 보정을 이용한 제한된 환경에서의 디지털 이미지 상관법

오주환[a], 김종민[b], 이철수[b*]

Digital Image Correlation using Image Calibration under Restricted Environment

Ju Hwan Oh[a], Jong Min Kim[b], Cheol Soo Lee[b*]

[a] *Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Sogang University*
[b] *Department of Mechanical Engineering, Sogang University*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 10 June 2021
Revised 19 July 2021
Accepted 21 July 2021

Keywords:
Digital image correlation
Perspective transformation
Image warping
Tensile test
Strain field

ABSTRACT

Digital Image Correlation (DIC) is a new method of measuring material properties. DIC requires a fixed camera and a separate instrument to acquire images. The measurement position and orientation for the DIC measurement of a workpiece are severely constrained. Therefore, additional devices are required. In this study, only a marker with a grid pattern was attached, and a photograph of a specimen surface was captured without additional equipment. Specimen images were moved and tilted because the camera would shake during the experiment and the camera and specimen were not parallel. The acquired specimen images might be shifted or deformed. Sample images were acquired form various angles and then calibrated with perspective transformation by a developed algorithm and software. Surface strain (or deformation) field data were obtained using the calibrated specimen images and DIC. Therefore, the developed algorithm was verified by comparing the strain field data of the corrected DIC images.

1. 서 론

구조물 및 기계의 재료 선정에 있어서 재료의 기계적 물성은 매우 중요하다. 인장 시험(tensile test)은 대표적인 재료 물성 측정 방법 중 하나로, 측정하고자 하는 재료의 시편(specimen)을 일정한 속도로 늘어나면서 발생하는 하중과 시편 길이의 변화를 이용하여 재료 물성을 파악한다. 시편 표면에 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착하여 시편의 길이 변위량을 측정한다. 그러나 기존의 스트레인 게이지를 이용한 측정 기법은 센서가 온도, 습도에 민감하고, 센서의 부착 형태에 따른 오차가 발생한다는 문제점이 있다. 그래서 이에 대한 해결 방법으로 디지털 이미지 상관법이 문제 해결의 가능성을 제시하고 있고, 이에 른 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-8].

디지털 이미지 상관법(digital image correlation: 이하 DIC)은 재료의 기계적 물성을 평가하기 위해 새롭게 제안되는 측정 기법이다. DIC 기법은 변형 전후의 시편의 디지털 이미지 정보를 분석하여, 시편 표면의 변위량(displacement)을 얻는 방법이다. 시편 표면을 촬영하여, 변형 전, 후의 시편의 이미지의 각 픽셀의 명암값(grayscale level)을 수학적 계산을 통해 변형 전, 후 이미지 간의 상관관계를 분석한다.

시편 사진으로 시편의 표면에서 얼마나 변형이 일어나는지를 알 수 있어 변위량과 변형률(strain)을 시각적인 접근으로 손쉽게 구할 수 있다[1]. 그리고 균일하지 않은 시편에 대해서도 특정 부분의 변형률만 구할 수 있다는 장점도 가지고 있다.

* Corresponding author. Tel.: +82-2-705-8646
E-mail address: cscam@sogang.ac.kr (Cheol Soo Lee).

그러나 정확도가 높은 DIC 기법을 위해서는 정밀하게 촬영된 시편 사진이 필요하다. 신뢰할만한 결과를 얻기 위해 카메라 렌즈에 의해 발생하는 왜곡을 최소화될 수 있어야 한다. 이러한 이유에서 시편 표면 사진과 실제 시편의 변형 사이에 오차가 발생하지 않기 위한 실험 환경 조성도 필요하다. 카메라 렌즈와 시편 표면이 정확하게 평행해야 하고, 인장 외에 다른 움직임에 영향을 받지 않아야 한다.

그래서 대부분의 DIC 관련 선행 연구에서는 고해상도의 CCD 카메라를 이용하고, 카메라는 시편과 정확히 평행한 각도로 고정시켜 이미지를 얻는다. 그래서 DIC 기법은 카메라를 고정하기 힘든 제한된 환경에서는 사용하기에는 어려움이 있다.

본 연구에서는 인장 시험 시에 격자 무늬판을 붙인 시편을 이용한다. 카메라는 임의의 각도로 배치하여 기울어진 시편 표면을 촬영한다. 기울어진 각도의 사진 보정을 검증하기 위해 3대의 카메라를 이용하여 인장 시험을 동시에 촬영한다. 2대의 카메라는 거치대로 고정하고, 1대의 카메라는 손으로 들고 촬영하여 이미지에 노이즈를 주었다. 촬영한 이미지들을 가지고 DIC 알고리즘을 통해 시편 표면의 변형률을 계산한다. 그리고 사진에서 격자무늬를 기준으로 이미지 재배열 알고리즘을 통해 이미지를 보정한다. 보정된 이미지를 DIC 알고리즘으로 시편 표면의 변형률을 측정한다. 보정 전, 후 시편 이미지의 DIC 결과를 비교하여 이미지 보정에 대한 유효성을 평가하였다[9-11].

2. 디지털 이미지 상관법과 이미지 보정에 대한 알고리즘

2.1 디지털 이미지 상관법

디지털 이미지 상관법은 물체의 외력에 의한 변형 전, 후 이미지의 상관관계를 분석하여 각각의 지점의 변위 및 변형률을 측정하는 비접촉 비전 계측 방법 중 하나다. 이미지 상관법을 이용하는 계측 방법은 크게 2D 계측 방법과 3D 계측 방법으로 구성된다. 2D 계측 방법은 하나의 카메라를 이용하여 물체의 표면 내 변위(in-plane displacement)를 측정한다. 3D 계측 방법은 두 개 이상의 카메라를 이용하여 표면 내 변위와 표면 외 변위(out-of-plane displacement)를 동시에 측정한다. 두 가지 모두 변형 전, 후 이미지의 상관관계 분석을 위하여 카메라를 통한 획득한 영상의 명암값을 이용하여 상관관계를 분석한다[1-8].

일반적으로 사용되는 카메라는 물체의 표면 정보를 0~255 사이의 명암 값으로 표현하여 같은 명암 값을 갖는 지점이 전체 이미지에서 무수히 많게 된다. 그래서 상관관계의 비교가 불가능하다.

디지털 이미지 상관법을 이용한 계측 방법은 이러한 점을 고려하여 변형 전, 후 이미지에서 서브 셋을 생성한다. 서브 셋은 이미지에서 하나의 픽셀의 특징을 주변 픽셀들의 명암값으로 표현하는 것이다. 변형 전 이미지에서 변위량을 구하고 싶은 픽셀 $P(x_i, y_j)$을 기준으로 $(2\,M+1)\times(2\,M+1)$ 크기의 서브 셋을 생성한다. M은 마스크(mask)로, 서브 셋의 크기를 의미한다. 사용할 이미지의 픽셀 크기에 따라 서브 셋의 크기를 조절한다.

Fig. 1은 변형 전, 후 시편 표면 이미지의 서브 셋을 나타낸 것이다. 변형 전의 서브 셋을 변형 후의 사진에서 매칭되는 서브 셋을 찾는다. Fig. 2는 DIC로 변위량을 찾는 방법을 표현한 것이다. 변형 전 이미지의 픽셀 좌표$f(x_i, y_j)$는 변형 후 이미지의 픽셀 좌표$g(x_i', y_j')$로 매핑 될 수 있다. 이때의 함수를 형상 함수라고 하며, 식 (1)으로 계산된다.

$$\begin{aligned} x_i' &= x_i + u \\ y_i' &= y_i + v \end{aligned} \qquad (i, j = -M : M) \tag{1}$$

변형 전 이미지의 $P(x_i, y_j)$에서 생성된 서브 셋을 이용해 식 (2) sum-squared difference (SSD) 기준을 적용하여 C_{ssd}를 계산한다[1].

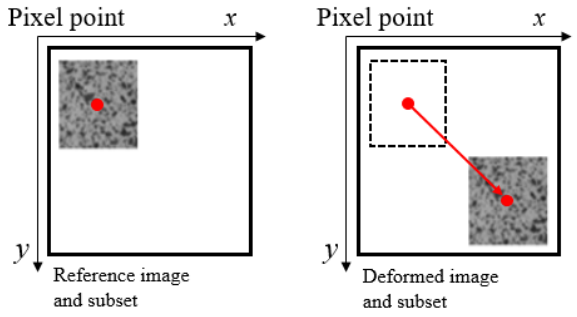
$$C_{ssd} = \sum_{i=-M}^{M} \sum_{j=-M}^{M} [f(x_i, y_j) - g(x_i', y_{jprime})]^2 \tag{2}$$

모든 지점에서의 서브 셋과의 상관관계를 비교하여 C_{ssd}가 가장 작은 지점이 매칭점이 된다. 변형 전 서브 셋의 중심 픽셀 좌표 값과 변형 후 이미지에서 매칭된 서브 셋의 중심 픽셀 좌표 값의 차이인 *(u, v)*가 변위량이 된다.

Fig. 3은 시편 사진에서 사각형 메쉬(mesh)를 생성하고 각 사각형 영역에서 변형률을 계산한 것이다. 변형 전 이미지에서 일정한 그리드(grid) 픽셀 간격으로 한 변의 길이가 그리드 인 메쉬를 만든 후 사각형의 각 모서리 부분의 4개의 픽셀의 변위량을 구한다. 4개의 픽셀의 변위량의 차이를 계산하면 메쉬의 변형률을 구할 수 있다[9-11,16].

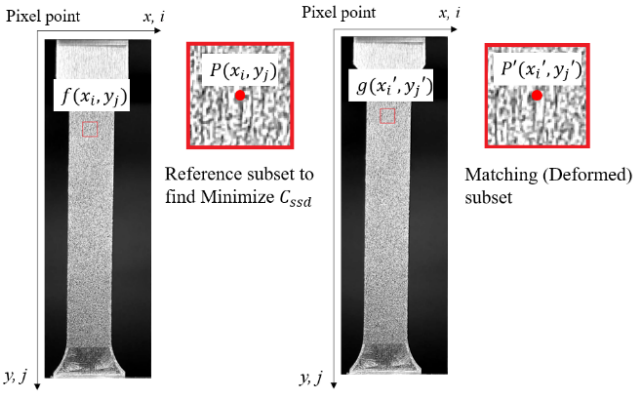
2.2 투영 변환

DIC는 이미지를 이용한 기계적 물성 평가 기법이다. 그래서 정확한 DIC 결과를 얻기 위해서는 정밀하게 촬영된 시편 이미지가 필요하다. 하나의 카메라로 시편의 표면을 촬영하여 변형률을 계산하는 2D-DIC의 경우에는 시편 표면과 카메라 렌즈가 평행해야 한다. 카메라가 기울어진 채로 촬영할 경우, 촬영된 시편은 모든 표면이 균일하지 않게 된다. Fig. 3의 (a)에서 생성하는 메쉬가 실제보다 특정 부위에서는 크거나 작게 계산되게 된다. 이는 DIC 결과에도 큰 영향을 미치게 된다. 이를 보정하기 위한 방법이 투영



(a) Reference image (b) Deformed image

Fig. 1 Digital Image Correlation



(a) Reference image (b) Deformed image

Fig. 2 Find matching point that compared subset of reference image to subset of deformed image

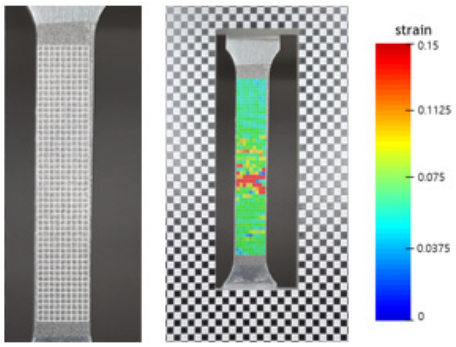
변환(perspective transform)이다.

투영 변환은 이미지 재배열(warping) 기법이다. Fig. 4는 투영 변환을 픽셀 좌표로 표현한 것이다. 이미지에서 변환하고 싶은 영역의 각 모서리의 픽셀 좌표(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)를 기준으로 사각형을 생성한다. 그리고 새로운 픽셀 좌표계를 생성하여 변환 후 원하는 사각형 모양의 각 모서리의 픽셀 좌표(x_1', y_1'), (x_2', y_2'), (x_3', y_3'), (x_4', y_4')를 지정한다. 변환 전 이미지의 사각형 내부의 모든 픽셀의 값을 새로운 좌표 내부의 각각의 픽셀에 투영시키는 방식으로 이미지를 재배열한다.

$$c\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = T\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3}$$

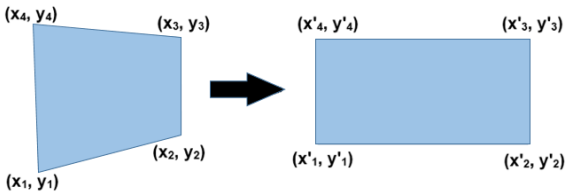
여기서 c는 상수(non-zero constant)이고, T는 변환행렬(transform matrix)이다.

$$T = \begin{pmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \\ t_4 & t_5 & t_6 \\ t_7 & t_8 & 1 \end{pmatrix} \tag{4}$$



(a) (b)

Fig. 3 (a): Making mesh at specimen image (b): Strain diagram that calculated by DIC



(a) Before transform (b) After transform

Fig. 4 Perspective Transform

식 (3)에서 첫 번째, 두 번째 행을 세 번째 행에서 구한 c로 나누어서 정리하면 다음 식 (5)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} (t_7x + t_8y + 1)x' - t_1x - t_2y - t_3 = 0 \\ (t_7x + t_8y + 1)y' - t_4x - t_5y - t_6 = 0 \end{aligned} \tag{5}$$

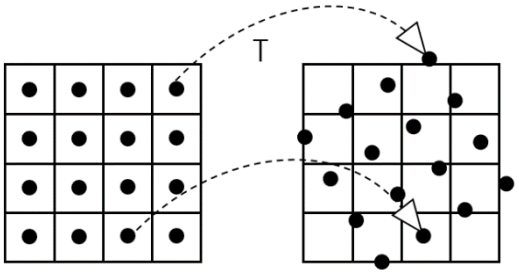
x'와 y'의 식으로 정리하면,

$$\begin{aligned} x' &= \frac{t_1x + t_2y + t_3}{t_7x + t_8y + 1} \\ y' &= \frac{t_4x + t_5y + t_6}{t_7x + t_8y + 1} \end{aligned} \tag{6}$$

변환 전 이미지의 픽셀 좌표 상의 4쌍의 (x, y)좌표와 변환 후 이미지의 픽셀 좌표가 될 4쌍의 (x′, y′)를 갖고 있으면, 식 (4)의 변환행렬 T의 t_1~t_8를 모두 구할 수 있다[12-16].

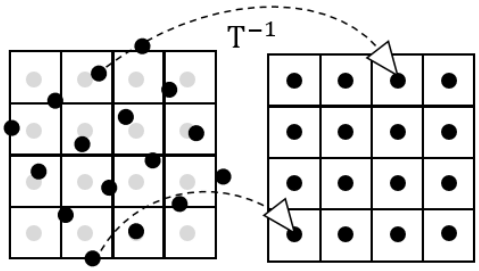
변환 전 이미지의 픽셀 좌표의 모든 점(x, y)을 변환행렬로 계산된 새로운 이미지의 픽셀 좌표(x′, y′)로 투영시킨다. Fig. 5는 투영 변환 기법의 하나인 전치 이미지 재배열(forward image warping)을 픽셀 단위의 그림으로 표현한 것이다.

하지만 투영 변환 시 변환 전 이미지의 사각형 영역 내 픽셀 개수가 변환 후 이미지의 사각형 영역 내 픽셀 개수보다 적으면 변환 후 이미지 내의 모든 픽셀에 대응되지 못한다. 그러면 이미지 내 빈 픽셀이 존재하게 되는데, 이런 문제를 해결하기 위해 역 이미지



(a) Before transform (b) After transform

Fig. 5 Forward Image Warping



(a) Before transform (b) After transform

Fig. 6 Backward Image Warping

재배열(backward image warping)을 사용한다.

Fig. 6은 역 이미지 재배열을 픽셀 단위의 그림으로 표현한 것이다. 변환 후의 이미지의 픽셀들을 변환행렬의 역 행렬을 통해 매칭되는 변환 전 픽셀 데이터를 가져오는 방식이다.

$$c\begin{pmatrix}x\\y\\1\end{pmatrix}= T'\begin{pmatrix}x'\\y'\\1\end{pmatrix},\ T' = T^{-1} \tag{7}$$

$$T=\begin{pmatrix}t_1' & t_2' & t_3'\\ t_4' & t_5' & t_6'\\ t_7' & t_8' & 1\end{pmatrix} \tag{8}$$

계산 방법은 전치 이미지 재배열과 동일하게 T'를 구할 수 있다. 주어진 상황에 따라 2가지의 이미지 재배열 방식 중 선택하여 사용하면 투영 변환 시 정확한 이미지를 얻을 수 있다.

2.3 이미지 흔들림 보정

촬영 시에 카메라를 손으로 들고 사진을 찍게 되면, 정확한 위치의 사진이 나오도록 촬영하는 것은 불가능하다. 연속 사진 촬영이나 동영상 촬영을 거치대 없이 하게 되면, 손 떨림에 의해 사진 속 피사체의 위치가 계속 변하게 된다.

이는 디지털 이미지 상관법에는 치명적인 오류 원인이 된다. DIC 기법은 변형 전 시편 이미지를 촬영하고, 시간에 따라 변형되는 시편 이미지를 연속적으로 촬영하여 픽셀단위로 이미지를 비교한다. Fig. 7은 손 떨림으로 인한 시편 이미지의 평행이동, 회전,

Fig. 7 Transformed image

기울어짐, 크기 변화에 따른 이미지의 변화이다. 이는 이미지의 픽셀 단위로 계산을 하는 DIC 결과 데이터에 큰 영향을 미친다.

또한 DIC 진행 시 생성한 서브 셋이 변형 후 이미지의 서브 셋과 매칭되지 않아 DIC 알고리즘 자체도 사용이 불가능해질 수 있다. 그래서 모든 DIC 관련 연구에서는 카메라를 흔들리지 않게 고정시켜 오차가 발생할 수 있는 상황을 배제하고 실험을 진행한다.

투영 변환은 변환 후 이미지의 크기를 임의로 정할 수 있고, 변환 전 이미지 내에서 정한 4개의 점을 이루는 사각형 영역에 의해서만 결정되는 특징이 있다. 이 점을 이용하면 손 떨림에 의한 이미지 왜곡에 영향을 받지 않는 이미지를 얻을 수 있다.

하나의 피사체를 다양한 각도에서 촬영하여 얻은 이미지들을 물체의 특징점들을 기준으로 잡고 변환하면, 변환 후 피사체의 위치는 모두 동일하게 나타나기 때문이다.

인장 시험 시 투영 변환을 사용하기 위해서는 변환에 사용될 특징점들이 필요하다. 시편은 시간에 따라 인장되며 시편의 특징점도 계속 움직이게 되어 시편의 특징점을 기준으로는 투영변환을 할 수 없다. 따라서 시편에 이미지 재배열에 기준이 될 격자 무늬판을 붙이고 인장 시험을 진행한다.

Fig. 8은 격자 무늬판을 시편에서 인장이 일어나지 않는 부분에 붙인 사진이다. 인장 시험 시 격자 무늬판의 위치가 유지되고, 중앙이 뚫려있는 모양을 하고 있어 DIC를 진행할 때도 영향을 주지 않도록 설계되었다.

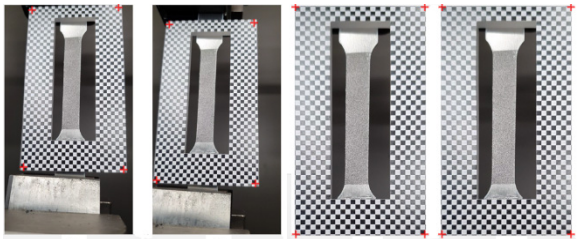
시편과 평행한 위치에 있어서 이미지 보정 시 격자 무늬판을 기준점으로 잡고 재배열하여도 시편 표면이 평행하게 나오게 된다. 그리고 격자 무늬판은 변형이 일어나지 않기 때문에 이미지 보정을 하여도 시편의 변형이 이미지 내에 잘 나타나게 된다.

Fig. 9는 격자 무늬판을 변환 전 이미지의 기준으로 잡고 이미지 재배열을 진행한 것이다. 촬영된 이미지는 실제 크기가 동일한 격자 무늬 형상을 가지게 된다. 따라서 시험 중간 카메라가 흔들려서 각도가 변하거나, 피사체로부터 거리가 멀어져도 동일한 크기의 격자 무늬판을 가지는 이미지를 얻을 수 있다. 시편의 인장 외의 모든 움직임에 영향을 받지 않는 이미지를 얻을 수 있는 것이다.

2.4 렌즈 왜곡 보정

Fig. 10은 카메라 볼록렌즈의 굴절률에 의해 발생하는 방사 왜곡(radial distortion) 을 표현한 것이다. 이미지의 중심으로부터 원

Fig. 8 Checkerboard at specimen



(a) (b) (a′) (b′)

Fig. 9 Photos taken during tensile testing and calibrated photos. Photos taken while the camera was shaking. (a), (b) Image calibrated by perspective transformation based on edge of checkerboard (a′), (b′)

형으로 멀어질수록 실제 위치보다 가까워지거나 멀어진 모습으로 나타나는 왜곡이다.

격자 무늬 보드가 사진에 같이 촬영되면, 카메라에서 발생하는 렌즈 왜곡에 대해서 보정이 쉽게 가능하다. 방사 왜곡을 계산하기 위해서는 카메라 관련 식이 모두 제거된 정규화 이미지 평면(normalized image plane)이 필요한데, 촬영한 이미지의 격자 무늬 자체가 새로운 좌표계로 사용할 수 있다. 따라서 새로운 픽셀 좌표계 생성을 위한 식을 생략하고 카메라 왜곡을 보정할 수 있다[17-19].

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = (1 + k_1 {r_n}^2 + k_2 {r_n}^4) \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \tag{9}$$

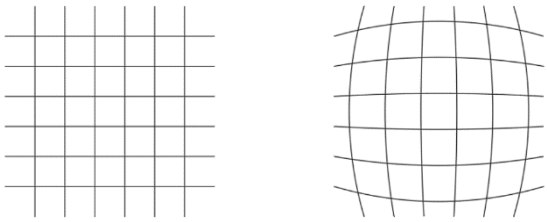
(x_d, y_d)는 왜곡이 있는 이미지에서의 픽셀 좌표이고 k_1, k_2는 방사 왜곡 계수, (x_n, y_n)는 정규화 이미지 평면에서의 픽셀 좌표이며 r_n은 왜곡이 없을 때의 이미지 중심까지의 거리다.

3. 디지털 이미지 상관법에 사용될 이미지 촬영을 위한 인장실험

3.1 실험 장비

Fig. 11은 실험에 사용된 장비 설명이다. 조명 장치는 시판되는 카메라 거치대가 있는 링 조명을 사용하였다. 카메라는 3840 × 1920픽셀의 해상도를 가지는 포터블 카메라 3대를 사용하였다.

시편은 AI6061 알루미늄 인장 시편을 사용하였고 시편 표면



(a) No distortion (b) Radial Distortion

Fig. 10 Distortion image

의 명암값이 잘 표현되기 위해, 페인트로 반점 패턴(speckle pattern)을 표면에 칠한다.

격자 무늬가 그려진 아크릴판을 부착하여 이미지 재배열 시에 각 모서리 부분을 기준으로 하여 이미지를 보정한다. 가로 110 mm, 세로 80 mm, 두께 5 mm 아크릴판에 안쪽이 뚫려있는 형상을 하고 있고 단위 격자 무늬 칸의 크기는 2.5 × 2.5 mm^2이다.

3.2 실험 방법

만능시험기(9 kN)는 상온에서 5 mm/min 속도로 인장 시험을 진행하였다. 이미지 보정 알고리즘을 검증하기 위해 같은 여러 각도에서 인장 시편을 촬영한다. 시편과 카메라가 평행하지 않은 상태에서, 3대의 카메라를 이용해 동시에 촬영한다.

카메라 1과 카메라 2는 거치대로 고정시킨 상태에서 촬영하고 카메라 3은 손으로 들고 촬영한다. 3대의 카메라에서 촬영된 동영상들은 실험 시간이 모두 같도록 설정하고 동영상에서 시편이 인

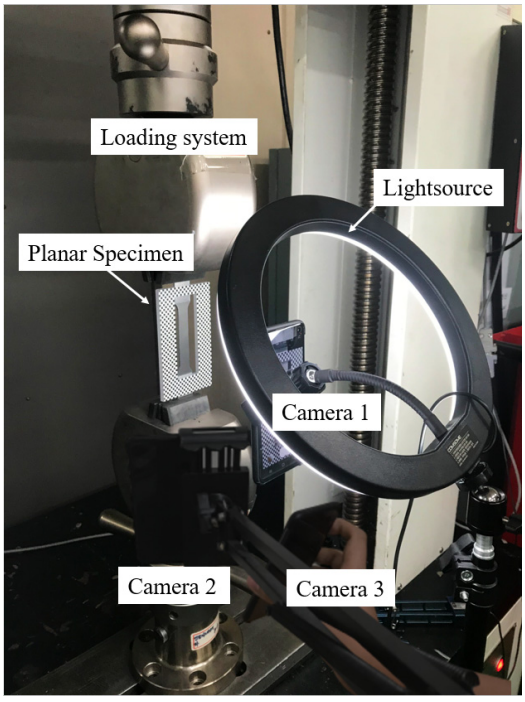


Fig. 11 Experimental Equipment

장되기 시작하는 순간을 기준으로 5초마다 이미지 캡쳐를 한다.

시편이 인장되기 시작할 때의 이미지를 DIC에서 변형 전 이미지로 사용하고 나머지 이미지들을 시간에 따른 변형 후 이미지로 사용한다.

모든 이미지들은 인장 시편에 부착된 격자 무늬판의 각 모서리 끝 4부분을 기준점으로 잡고 변환 후 이미지의 크기가 모두 동일하도록 투영 변환을 진행한다.

이미지에서 시편의 표점 거리에 해당하는 중심 부분을 DIC에 이용하며 서브 셋 크기는 101 × 101픽셀로 하여 DIC를 진행한다. 시편 표면을 그리드 간격으로 매칭 점들을 생성하고, DIC 결과의 매칭점의 x축, y축 변위량를 얻는다. 그리드 간격으로 생성된 지점들을 꼭지점으로 정사각형 모양으로 메쉬를 생성한다. 메쉬를 이루는 4개의 점에서의 변위량 차이를 계산하여 메쉬의 변형률을 계산하고, 제트 컬러 맵(jet color map)으로 표현한다.

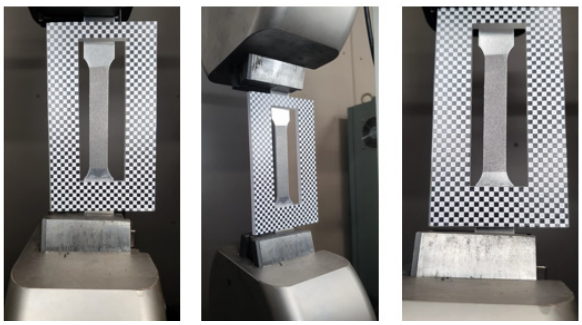
4. 구현 및 검증

실험은 1회 진행하였고, 카메라 1과 카메라 2는 카메라 거치대를 이용하여 고정된 상태에서 촬영하였다. 카메라 3는 손으로 들고 촬영하여 카메라가 흔들리는 환경에서 촬영하였다. Fig. 12는 3대의 카메라를 이용하여 얻은 실험 시 시편의 표면 사진이다.

인장 시험은 동영상 시간 기준으로 63초에 인장 시편이 끊어지며 종료되었다. 0초부터 60초까지 5초 간격으로 이미지 캡쳐를 하여 1장의 변형 전 이미지와 12장의 변형 후 이미지를 얻었다.

이미지 보정은 Fig. 12에서 얻은 사진의 격자 무늬판 모서리 부분을 4점으로 잡고 투영 변환을 통해 이미지 재배열을 하였다. 보정 후 이미지의 크기는 전과 비교해 x축, y축으로 각각 200픽셀씩 늘어난 4040 × 2360픽셀이다.

보정 전의 이미지는 픽셀 좌표 내에서 40픽셀 간격으로 DIC를 진행한다. 각 요소의 변위량을 계산하여 변형 후의 변형률 값을 얻었다.



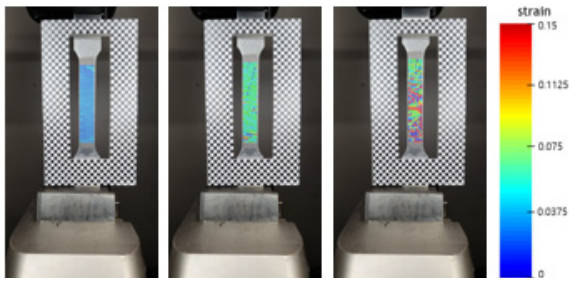
(a) (b) (c)

Fig. 12 Captured photos of a video clip of a tensile specimen taken with a smartphone camera during a tensile test ((a): Camera 1, (b): Camera 2, (c): Camera 3)

Fig. 13와 14는 카메라 1로 촬영한 시편 표면을 보정 전 사진의 DIC 결과와 보정 후 사진의 DIC 결과를 나타낸 것이다. 인장 50초 경과 사진을 비교하면(c) 보정 전 사진의 계산된 변형률 값이 더 크게 나왔다. 그리고 변형률 분포도 균일하지 않았다. 보정 후 사진의 변형률 분포는 시편의 파단 부분에서 변형률 값이 크게 나온 것을 확인할 수 있었고 그 외의 부분에는 분포가 일정하다. 보정 후의 사진의 변형률 결과가 더 일정하게 나온 것을 확인할 수 있었다.

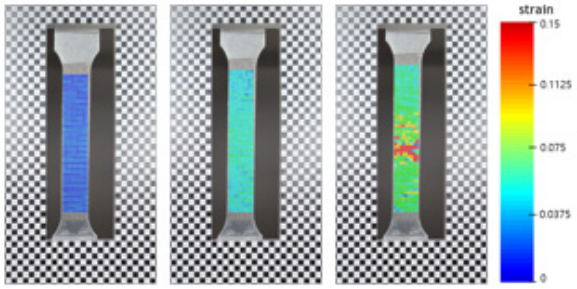
Fig. 15과 16은 카메라 2로 촬영한 시편 표면을 보정 전 사진의 DIC 결과와 보정 후 사진의 DIC 결과를 나타낸 것이다. 인장 50초 경과 사진을 비교하면(c), 보정 전 사진의 계산된 변형률 값은 Fig. 13에서 구한 변형률 값과 20%의 오차가 있었다. 보정 후 사진의 변형률 값은 Fig. 14에서 구한 변형률 값과 4% 이내의 오차를 보였다. 그리고 변형률의 분포도 비슷하게 나타났다. 보정 후의 사진의 변형률 결과가 더 일정하게 나온 것을 확인할 수 있었다.

카메라 3은 거치대에 카메라를 고정하지 않고 손으로 촬영을 하여 시험이 진행되었다. 이미지 내 시편의 크기가 변하고 각도가 틀어지면서 서브 셋 크기가 맞지 않아 DIC 알고리즘이 변형 후



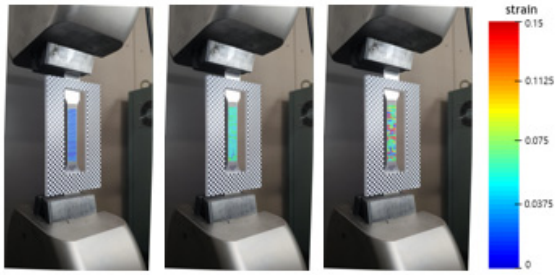
(a) (b) (c)

Fig. 13 Strain of DIC result by uncalibrated image taken in Camera 1 ((a): tensile test picture after 10 sec, (b): after 30 sec, (c): after 50 sec)



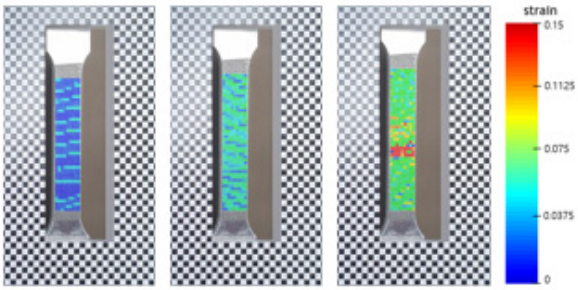
(a) (b) (c)

Fig. 14 Strain of DIC result by calibrated image taken in Camera 1 ((a): tensile test picture after 10 sec, (b): after 30 sec, (c): after 50 sec).



(a) (b) (c)

Fig. 15 Strain of DIC result by uncalibrated image taken in Camera 2 ((a): tensile test picture after 10 sec, (b): after 30 sec, (c): after 50 sec)



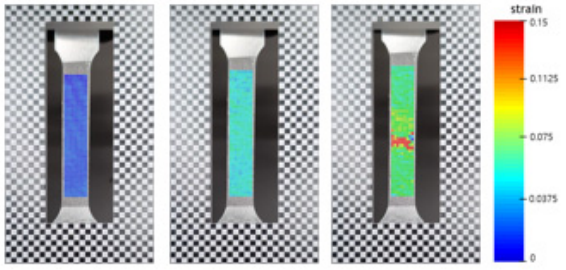
(a) (b) (c)

Fig. 16 Strain of DIC result by calibrated image taken in Camera 2 ((a): tensile test picture after 10 sec, (b): after 30 sec, (c): after 50 sec)

서브셋 지점을 제대로 찾지 못했다.

Fig. 17은 카메라 3에서 촬영한 시편 사진을 보정하고 DIC를 통해 변형률을 계산한 것이다. 보정 전의 이미지는 외부의 노이즈로 인해 DIC 알고리즘이 매칭되지 않았다. 보정 후 DIC로 계산된 변형률 값은 앞의 Fig. 15, 17과 5% 이내의 오차를 보였다. 변형률의 분포도 시편 파단 영역에 변형률이 집중된 비슷한 모습을 보인다.

Table 1은 카메라마다 촬영한 사진들의 DIC 결과이다. Ref는 보정 전 사진, Def는 보정 후 사진을 의미한다. 시편 표면에 변형률이 균일하게 분포되지 않아 전체 메쉬의 변형률의 평균값으로 작성한 표이다. 이미지 보정을 하지 않은 DIC 결과의 경우 동일한 실험임에도 변형률 값이 다르게 나타났다. 인장 50초 경과 사진의 경우 변형률 값이 20%의 오차를 갖고 있다(카메라 1, 카메라 2). 이미지 보정 후 DIC 결과의 경우 변형률 결과가 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 같은 시간의 변형률 값이 5% 이내의 오차를 갖는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 18은 이미지 보정 후 DIC로 얻은 변형률 값과 이론적으로 구한 변형률 값과 비교한 그래프이다. 표점거리 60 mm 기준 시편은 1분에 5 mm 만큼 인장되는데, 이 때의 이론적으로 구한 이론값과 3대의 카메라에서 얻은 변형률 값과의 오차는 전 구간에서 0.001~0.003만큼 일정하게 나타났다.



(a) (b) (c)

Fig. 17 Strain of DIC result by calibrated image taken in Camera 3 ((a): tensile test picture after 10 sec, (b): after 30 sec, (c): after 50 sec)

Table 1 Strain result by time calculated by DIC

Time	Camera 1		Camera 2		Camera 3
	Ref	Def	Ref	Def	Def
10 s	0.02095	0.01123	0.01312	0.01316	0.00819
20 s	0.03587	0.02352	0.02687	0.02611	0.02122
30 s	0.05415	0.04102	0.04326	0.04295	0.04049
40 s	0.07214	0.06080	0.06080	0.05965	0.05158
50 s	0.09520	0.07610	0.08082	0.07893	0.07547

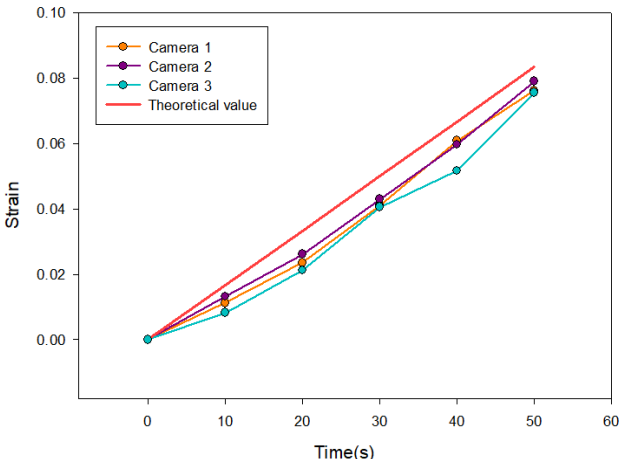


Fig. 18 Strain result by time calculated by DIC with theoretical value

5. 결 론

본 연구에서는 인장 시험 시 하중에 따른 시편 표면의 변형률을 디지털 이미지 상관법(DIC)을 활용하여 측정하기 위해 인장 시험 과정을 포터블 카메라로 촬영하였다.

촬영 시 시편과 카메라가 평행하지 않도록 다양한 각도에서 촬

영하였고, 추가로 카메라가 움직임으로 이미지에 노이즈가 발생할 수 있는 조건에서 촬영하였다.

개발된 알고리즘을 통한 이미지 보정을 적용한 후 DIC를 진행하였을 때 여러 각도에서 촬영된 이미지도, 각 시편의 변형률의 분포가 동일하게 나타났다. 또한 흔들림이 있는 시편의 이미지의 경우도 보정 후 변형률의 분포가 같게 나타났다.

본 논문에서 제시하는 제한된 환경에서의 이미지 보정을 이용한 디지털 이미지 상관법은 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 기존의 DIC 실험 방식과 같이 카메라를 고정하지 않아도 DIC를 수행 할 수 있어서 카메라 각도를 정확하게 고정할 수 없는 제한적인 환경에서도 DIC를 수행할 수 있다.

(2) 인장 시험 중에 발생하는 진동 노이즈에 의해 시편 이미지가 흔들리는 환경에서도 DIC를 수행할 수 있다. 또한 불완전한 인장 시험으로 인한 시편의 인장 외의 움직임을 보정 할 수 있다.

(3) 같은 시간대에 촬영된 사진을 DIC로 계산할 때 이미지 보정을 하지 않은 경우 변형률 값은 20%의 오차를 가졌고, 변형률의 분포도 다르게 나타났다. 그러나 개발된 이미지 보정 알고리즘을 적용한 경우는 변형률 값은 약 5% 이내의 오차를 가지며, 변형률의 분포도 동일하게 갖는 것을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 개선된 DIC 알고리즘은 노이즈가 발생할 수 있는 제한된 환경에서도 이미지 보정 알고리즘을 사용하여 DIC 결과의 오차를 줄여 더 정확한 변형률 데이터를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

References

[1] Kim, M. G., 2021, Prediction of Mechanical Properties Using Micro Indentation and Digital Image Correlation, Master Thesis, Sogang University, Republic of Korea.

[2] Nguyen, V. -T., Kwon, S. -J., Kwon, O. -H., Kim, Y. -S., 2017, Mechanical Properties Identification of Sheet Metals by 2D-Digital Image Correlation Method, Procedia Eng., 184 381-389, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.108.

[3] Lava, P., Coppieters, S., Wang, Y., Van Houtte, P., Debruyne, D., 2011, Error Estimation in Measuring Strain Fields with DIC on Planar Sheet Metal Specimens with a Non-perpendicular Camera alignment, Opt. Lasers Eng., 49:1 57-65, https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2010.08.017.

[4] Hung, P., Voloshin, A. S., 2003, In-plane Strain Measurement by Digital Image Correlation, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., 25:3 215-221, https://doi.org/10.1590/S1678-58782003000300 0001.

[5] Pan, B., Qian, K., Xie, H., Asundi, A., 2009, Two-dimensional Digital Image Correlation for In-plane Displacement and Strain Measurement: A Review, Meas. Sci. Technol., 20:6 062001, https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001.

[6] Pan, B., Yu, L., Wu, D., 2014, High-accuracy 2D Digital Image Correlation Measurements using Low-cost Imaging Lenses: Implementation of a Generalized Compensation Method, Meas. Sci. Technol., 25:2 025001, https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/2/025001.

[7] Sutton, M. A., Yan, J. H., Tiwari, V., Schreier, H. W., Orteu, J. J., 2008, The Effect of Out-of-place Motion on 2D and 3D Digital Image Correlation Measurements, Opt. Lasers Eng., 46:10 746-757, https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.05.005.

[8] Pan, B., Yu, L., 2014, In-plane Displacement and Strain Measurements using a Camera Phone and Digital Image Correlation, Opt. Eng., 53:5 054107, https://doi.org/10.1117/1.OE.53.5.054107.

[9] Jerabak, M., Major, Z., Lang, R. W., 2010, Strain Determination of Polymeric Materials using Digital Image Correlation, Polym. Test, 29:3 407-416, https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.01.005.

[10] Smith, B. W., Li, X., Tong, W., 1998, Error Assessment for Strain Mapping by Digital Image Correlation, Exp. Tech., 22 19-21, https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.1998.tb02332.x.

[11] Blaber, J., Adair, B., Antoniou, A., 2015, Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software, Exp. Mech., 55 1105-1122, https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1.

[12] Dubrofsky, E., 2007, Homography Estimation, Master Thesis, Carleton University, Canada.

[13] Benhimane, S., Malis, E., 2007, Homography-based 2D Visual Tracking and Servoing, Int. J. Robot. Res., 26:7 661-676, https://doi.org/10.1177/0278364907080252.

[14] Brown, L. G., 1992, A Survey of Image Registration Techniques, ACM Comput. Surv., 24:4 325-376, https://doi.org/10.1145/146370.146374.

[15] Loop, C., Zhang, Z., 1999, Computing Rectifying Homographies for Stereo Vision, Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., 125-131, https://doi.org/10.1109/CVPR.1999.786928.

[16] Lava, P., Van Paepegem, W., Coppieters, S., De Baere, I., Wang, Y., Debruyne, D., 2013, Impact of Lens Distortions on Strain Measurements Obtained with 2D Digital Image

Correlation, Opt. Lasers Eng., 51:5 576-584, https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.12.009.

[17] Wang, J., Shi, F., Zhang, J., Liu Y., 2008, A New Calibration Model of Camera Lens Distortion, Pattern Recognit., 41:2 607-615, https://doi.org/10.1016/j.patcog.2007.06.012.

[18] Prescott, B., McLean, G. F., 1997, Line-Based Correction of Radial Lens Distortion, Graph. Models Image Process., 59:1 39-47, https://doi.org/10.1006/gmip.1996.0407.

[19] Hartley, R., Kang, S. B.,2007, Parameter-Free Radial Distortion Correction with Center of Distortion Estimation, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 29:8 1309-1321, https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.1147.

[20] Yoneyama, S., Kikuta, H., Kitagawa, A., Kitamura, K., 2006 Lens Distortion Correction for Digital Image Correlation by Measuring Rigid Body Displacement, Opt. Eng., 45:2 023602, https://doi.org/10.1117/1.2168411.

Ju Hwan Oh
M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Sogang University. His research interests are image calculation using digital image correlation and design of medical device and industrial robot.
E-mail: ojh82444@gmail.com

Jong Min Kim
Research professor in the Department of Mechanical Engineering, Sogang University. His research interests are Robot system and control and radiopharmaceutical automatic manufacturing system.
E-mail: griffon0@gmail.com

Cheol Soo Lee
Professor in the Department of Mechanical Engineering, Sogang University.
His research interests are geometric modeling and computer aided manufacturing and design of machine tools and medical device development and manufacturing.
E-mail: cscam@sogang.ac.kr