

**이미지 상관법을 이용한 휨 변형률 측정에 관한 연구**최인영<sup>a</sup>, 강영준<sup>b\*</sup>, 홍경민<sup>a</sup>, 고광수<sup>a</sup>, 이학성<sup>a</sup>**Study on the Measurement of Flexural Strain Using the Digital Image Correlation in the Three-Point Bending Test**In Young Choi<sup>a</sup>, Young June Kang<sup>b\*</sup>, Kyung Min Hong<sup>a</sup>, Kwang Su Ko<sup>a</sup>, Hak Sung Lee<sup>a</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Design, Graduate School of Chonbuk National University, Beakje-dearo, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 561-756, Korea<sup>b</sup> Department of Mechanical Design Engineering, Chonbuk National University, Beakje-dearo, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 561-756, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	26	March	2014
Revised	18	July	2014
Accepted	22	August	2014

*Keywords:*

Digital Image Correlation  
3 point bending test  
Deflection  
Flexural strain  
Aluminum 6061

**ABSTRACT**

Displacements and strains are very important for material evaluation as critical factors to a machine's life cycle and safety. Typically, the strain gauge has been employed to measure displacement and strain. However, this contact-type measurement method has disadvantages that are not quantified under the test conditions of a specific object shape, surface roughness, and temperature. In this paper, the measurement of deflection and flexural strain due to the three-point bending test is presented, employing Digital Image Correlation (DIC) methods. In order to ensure measurement reliability, DIC and universal test machine methods were compared by measuring the deflections and flexural strains developed by such bending tests.

**1. 서론**

기계 부품 및 구조물의 평가에 있어 변위 및 변형률의 측정은 매우 중요한 평가 요소 중 하나로서, 대부분 스트레인 게이지 (Strain gauge)와 같은 접촉식 방법을 이용하여 평가한다. 그러나 이러한 접촉식 평가 방법의 경우, 측정 물체의 표면상태, 온도, 습도 및 형상 등의 제약 조건에 의하여 측정이 불가능한 경우가 발생한다. 또한 접촉 부분에 대한 변위 및 변형률의 측정이 가능하여 접촉 방법 및 위치에 따라 오차가 발생하며, 결함의 진전이나 응력 분포 형태 등을 계측하기 어려운 특성을 갖고 있다.

특히 3점 굽힘 시험(3-Point bending test) 또는 4점 굽힘(4-

Point bending test)의 경우, 세라믹 소재 또는 복합재료와 같이 취성이 강한 재료의 인장 시험을 대신하여 탄성 계수 및 인장강도의 측정을 위하여 사용된다. 굽힘 시험을 이용한 기계적 물성 측정 방법의 경우, 스트레인 게이지 등의 접촉식 센서의 적용이 어려우며, 만능 시험기의 크로스헤드의 변위 및 휨 측정계(deflect meter) 등을 이용한다. 따라서 작용 하중에 의한 물체의 응력 분포 및 결함의 진전 형태 등의 계측이 어려운 단점을 갖고 있다.

이미지 상관법(Digital Image Correlation: DIC)을 이용한 계측 방법은 CCD 카메라를 이용하여 측정된 변형 전, 후 이미지를 분석하여 각각의 지점에 대한 변위 및 변형률 측정하는 비접촉 계측 방법으로서 하중에 의한 결함의 진전이나 응력 분포 형태의 계측이

\* Corresponding author. Tel.: +82-63-270-2453

Fax: +82-63-270-2460

E-mail address: yjkang@jbnu.ac.kr (Young June Kang).

가능하다. 또한 전자주사현미경(SEM), CT, X-ray 등의 다양한 영상장비와 연동하여 측정이 가능한 장점을 갖고 있어 기존의 접촉식 계측 방법을 대신하여 정밀 측정 분야에 많이 이용하고 있다<sup>1-3,5,7)</sup>.

본 논문은 복합재료와의 결합력이 우수하여 제품의 성형을 위하여 많이 사용되고 있는 알루미늄 6061 재료의 3점 굽힘 하중에 의한 처짐량(Deflection) 및 휨 변형률을 상관법을 이용하여 계측 하였다. 또한 상관법을 이용한 계측 결과를 만능시험기의 계측 결과와 비교하여 오차 분석을 수행하여 계측 결과의 신뢰성을 확보하였다.

상관법을 이용한 계측 방법을 이용하여 3점 굽힘 하중에 의한 변형을 측정하여 인장 및 압축 하중의 복합 작용으로 인하여 시편에 가해지는 응력 분포를 계측하였다.

## 2. 이미지 상관법

### 2.1 이미지 상관법을 이용한 계측 시스템

상관법을 이용한 계측 방법은 이미지 분석 기술을 이용한 비접촉 비전 계측 방법 중 하나로서, CCD 카메라를 이용하여 물체의 변형 전, 후의 상관관계(Correlation)를 분석하여 이미지의 각각의 픽셀(Pixel)에 대한 변위 및 변형률의 측정이 가능하다. 일반적으로 상관법을 이용한 계측 방법의 경우, 물체의 변형 전, 후 이미지를 측정하는 CCD 카메라의 개수 및 구성 형태에 따라 달라진다. 한 대의 CCD 카메라를 이용하여 물체의 면내 변위를 측정하는 2D 계측 시스템과 두 대의 CCD 카메라를 이용하여 스테레오 비전을 구성, 물체의 면내의 변위를 동시에 계측 가능한 3D 계측 시스템으로 구분 된다. Fig. 1은 한 대의 CCD 카메라를 이용하여 하중에 의한 물체의 X, Y 방향의 면내 변위를 계측 할 수 있는 2D 이미지 상관법 계측 시스템의 개략도를 나타낸 그림이다<sup>1,6,7)</sup>.

### 2.2 이미지 상관관계 분석 방법

이미지 상관법을 이용한 계측 방법의 경우, 물체의 변형 전, 후 이미지의 상관관계 분석하여 변위 및 변형률의 측정을 위하여 물체

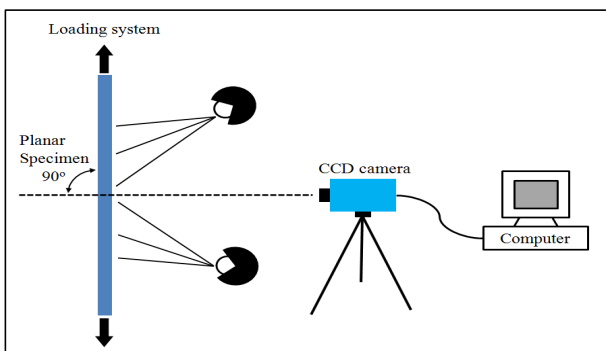


Fig. 1 Schematic of the 2D DIC measurement system

를 표현하는 명암(Gray Scale)을 이용한다. 따라서 한 지점에 대한 값을 비교할 경우, 같은 명암 값을 갖는 부분이 수없이 많기 때문에 이미지 상관법은 두 영상의 상관관계를 비교하기 위하여 서브셋(Subset)을 이용한다. 서브셋이란  $(2N+1) * (2N+1)$ 의 정사각형 형태의 작은 이미지를 의미하며, 중앙 지점의 픽셀의 변위 및 변형률을 찾고자 상관관계를 비교하는 이미지를 의미한다. 일반적으로 이미지 상관법을 이용하여 변형 전, 후 이미지의 상관관계를 비교하는 방법은 크게 상호상관관계(Cross Correlation: CC) 비교 방법과 제곱합 상관관계(Sum of Square Difference: SSD) 비교 방법이 존재한다. 상호상관관계 비교 방법의 경우 변형 전, 후 서브셋의 상관관계 계산 값이 최대 값을 나타내는 부분이 외력에 의한 물체의 변형 값을 나타낸 부분이며, 제곱합 상관관계 비교 방법의 경우, 반대로 최소 값을 갖게 된다. 아래 식 (1)의 경우, 제곱합 상관관계 비교 수식을 나타내는 식으로서  $f(x_i, y_j)$ 는 변형 전 이미지의 서브셋의 명암 값을,  $g(x'_i, y'_j)$ 는 변형 후 이미지의 서브셋의 명암 값을 나타낸다. Fig. 2는 제곱합 상관관계 비교 방법을 적용하여 변형 전, 후 이미지의 상관관계를 계산한 결과 값을 나타낸 그림으로 최소 값을 갖는 부분이 물체의 변형 위치를 나타낸다<sup>1,4,7)</sup>.

$$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2 \quad (1)$$

### 2.3 이미지 상관관계 분석 방법

이미지 상관법을 이용한 계측 방법의 경우, 외력에 의한 물체의 변형 전, 후 이미지의 상관관계를 분석하여 물체의 변위 및 변형률을 계측 한다. 이러한 이미지의 상관관계 비교를 위해서는 수많은 반복 연산이 필요하다. 따라서 이러한 반복 연산의 과정을 줄이기 위하여 변형 전 이미지에서 일정 간격을 두어 변위 및 변형률을 측정하고자 하는 지점을 선택하게 된다.

일반적으로 고체 물체의 경우, 외력에 의하여 연속적으로 변화하

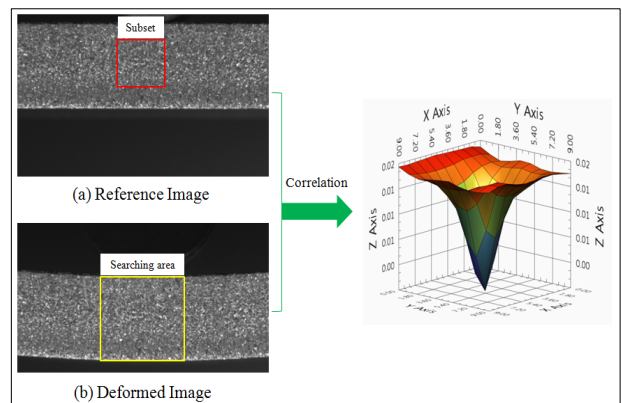


Fig. 2 Computed whole-field sum of square different coefficient distribution

는 특성을 갖고 있어 인접한 두 지점 사이에 변형은 상호 연관성을 갖게 된다. 따라서 이미지 상관법을 이용한 계측 방법은 외력에 의한 물체의 변형 전, 후 이미지를 분석하여 획득한 변위를 바탕으로 인접 지점의 변위 변화량의 예측하여 하나의 지도형태의 계측정보 획득이 가능하다.

Fig. 3은 이미지 상관법을 이용하여 외력에 의한 물체의 변위를 측정하는 방법을 나타낸 그림으로서, 변형 전 이미지의 서브셋과 변형 후 이미지의 서브셋의 상관관계를 분석하여 외력에 의한 물체의 변위 변화를 계측 한다. 또한 각각의 지점에서 측정된 변위를 바탕으로 주변 지점의 변위 예측을 위하여 형상함수(Shape Function)를 이용한다. 이미지 상관법을 이용한 계측 방법의 경우, 크게 0~2 차의 형상 함수가 사용되며, 외력에 의한 물체의 회전 및 전단의 영향을 고려하기 위하여 1차 또는 2차 형상함수를 이용한다. 식 (2)는 이미지 상관법을 이용한 계측 방법에 가장 많이 사용되는 1차 형상함수를 나타낸 것이다. 여기서  $\xi(x_i, y_j)$ 는 X좌표의 형상 함수,  $\eta(x_i, y_j)$ 는 Y좌표의 형상 함수,  $u$ 와  $v$ 는 이미지 상관법에 의하여 구한 각 지점의 변위,  $M$ 은 변형 전 이미지에서 변위를 측정하고자 하는 격자점의 크기를 나타낸다. 그러나 일반적인 고체 물체의 경우, 회전 또는 전단의 영향을 받기 때문에 식 (2)만 적용할 경우 오차가 발생한다. 식 (3)은 1차 형상함수를 나타낸 식으로서, 이미지 상관법에 의하여 구한 각각의 격자점의 변위를 회전 또는 전단의 영향을 고려하여 인접한 지점의 값을 구하는 형상함수다<sup>[1,4,7]</sup>.

$$\begin{aligned} x'_i &= x_i + \xi(x_i, y_j) \quad (i, j = -M : M) \\ y'_j &= y_j + \eta(x_i, y_j) \\ \xi_0(x_i, y_j) &= u \\ \eta_1(x_i, y_j) &= v \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \xi_1(x_i, y_j) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ \eta_1(x_i, y_j) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.4 이미지 상관법의 좌표 시스템

이미지 상관법을 이용한 계측 방법의 경우, 물체의 변형을 측정

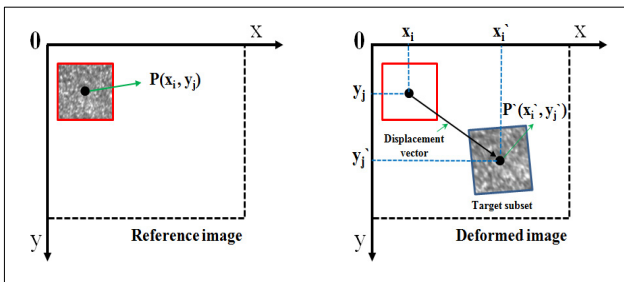


Fig. 3 Schematic illustration of a reference square subset of reference image and target subset of deformed image

하기 위해 CCD 카메라를 이용하여 촬영한 변형 전, 후 이미지의 상관관계를 비교하여 물체의 변형을 측정한다. 그러므로 이미지 상관법을 이용하여 측정된 물체의 변형 결과는 CCD 카메라의 이미지를 표현하는 픽셀 단위의 좌표계를 갖게 된다. 따라서 모든 결과값은 픽셀단위를 갖게 되며 이를 실제 거리로 환산하기 위해서는 이미지 상에 1픽셀이 갖는 실제 크기의 계측이 필요하다. Fig. 4는 이미지 상관법을 이용하여 측정된 실제 변위량을 실제거리로 환산하기 위하여 1픽셀 당 거리를 구하는 방법을 나타낸 그림이다. 실제 크기를 알고 있는 시편을 촬영한 이미지에서 이미지 상에서 차지하는 픽셀 개수로 나눠 구할 수 있다<sup>[4]</sup>.

### 2.5 휨 변형률 측정

Fig. 5는 3점 굽힘 하중에 의한 물체의 변형 형태와 휨 변형률을 측정하기 위한 변수를 나타낸 그림이며, 식 (4)은 ASTM D 790 규격에 따른 3점 굽힘 하중에 의한 휨 변형률 계산식을 나타낸다. 식 (3)에서  $D$ 는 3점 굽힘 하중에 의한 시편 중앙의 처짐량을 나타내며,  $L$ 은 지지 치구(Support Span)의 사이의 거리,  $d$ 는 시편의 두께를 나타낸다<sup>[8]</sup>.

3점 굽힘 하중에 의한 물체의 변형은 중앙 치구(Support Span) 부분에서 최대 처짐량이 발생하며, 이를 이용하여 휨 변형률을 계산한다. 따라서 이미지 상관법을 이용하여 중앙 치구 부분을 포함하도록 변위 해석 지점을 선정 한 후 처짐량을 측정하고, 최대 처짐량 값을 이용하여 식 (4)에 적용하여 휨 변형률의 측정이 가능하다.

$$\epsilon_f = 6Dd/L^2 \quad (4)$$

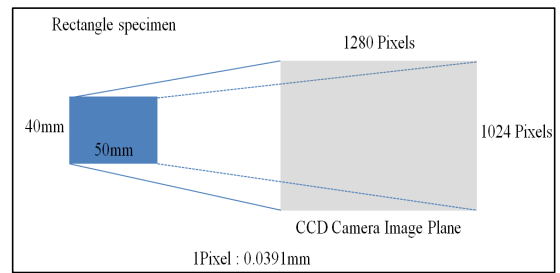


Fig. 4 Illustration of relation between the image resolution and specimen dimension

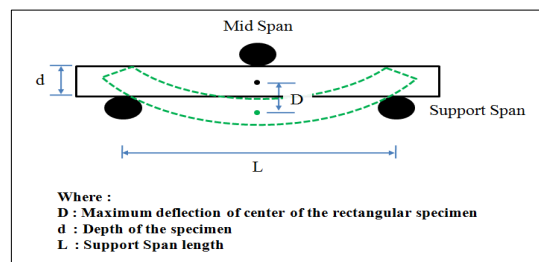


Fig. 5 Illustration of deformation by the 3-point bending load

### 3. 이미지 상관법을 이용한 3 점 굽힘 실험

Fig. 6은 알루미늄 6061 시편의 3점 굽힘 실험을 위한 조건과 시편의 형상을 그림을 나타낸 그림으로서, 만능시험기의 하중을 Table 1과 같이 단계하중(Step Load)를 가하여 시편의 처짐량을 측정하였다. 3점 굽힘 하중에 의한 물체의 처짐량과 휨 변형률을 측정하기 위하여 이미지 상관법을 이용한 계측 시스템을 Fig. 7과 같이 구성하였다. 측정오차를 줄이기 위하여 시편의 측면과 CCD 카메라가 서로 평행하도록 실험 장치를 구성하였다. 또한 시편의 단면에 할로겐 램프를 이용한 광원을 설치하여 시편 측면 요철에 의한 밝고 어두운 무늬가 무질서하게 발생하도록 하고, 각각의 하중에 의한 물체의 변형 형태를 CCD 카메라로 촬영하였다.

### 4. 이미지 상관법을 이용한 굽힘 변형 측정 결과

#### 4.1 이미지 상관법의 해석조건

Fig. 8은 이미지 상관법을 이용하여 알루미늄 시편의 처짐량 계

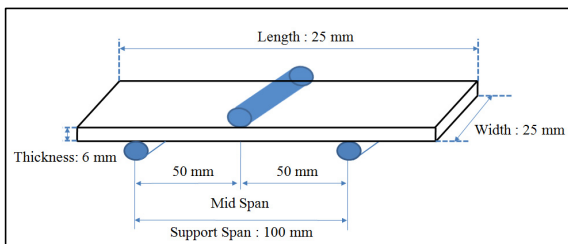


Fig. 6 Illustration of the specimen dimension and 3-point bending test condition

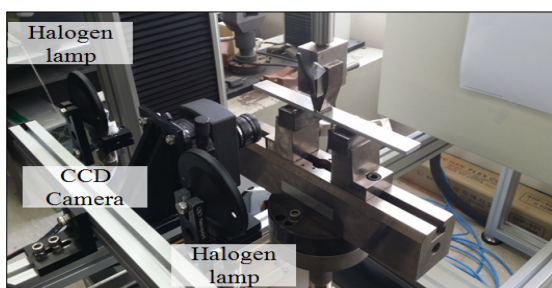


Fig. 7 Photography of digital image correlation experimental set up for 3 point bending test

Table 1 3 Point Bending test load condition

Load step	Load	Load Step	Load
1	10 Kgf	6	35 Kgf
2	15 Kgf	7	40 Kgf
3	20 Kgf	8	45 Kgf
4	25 Kgf	9	50 Kgf
5	30 Kgf		

측을 위한 변형 전 이미지에서 서브셋 분리 좌표를 격자무늬 형태로 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 각각의 격자점에서 서브셋을 추출한 후 변형 후 이미지에서 분리한 각 서브셋과 상관관계를 비교하여 가장 높은 상관관계를 갖는 변형 후 이미지의 서브셋 좌표를 이용하여 물체의 처짐량을 계산하도록 하였다. 변형 전 이미지에서 3점 굽힘 하중에 의한 알루미늄 시편의 처짐량 측정을 위하여 각 격자점의 간격을 1픽셀로 설정하여 총 21,840 (390 \* 56 Pixel) 격자 지점의 처짐량을 추적하였다.

#### 4.2 굽힘 하중에 의한 X방향 변위 및 변형률

Fig. 9는 굽힘 하중에 의한 시편의 움직임을 나타낸 그림으로서 굽힘 하중이 작용하는 중립면을 기준으로 상부의 경우 압축 하중이 작용하며, 하부의 경우 인장 하중이 작용하게 된다. 따라서 중립면을 기준으로 상부와 하중의 움직임이 서로 반대가 된다. Fig. 10은 이미지 상관법을 이용하여 3점 굽힘 하중에 의한 X 방향 변위를 측정된 그림이다. 그림에서 보듯 35 kgf 이상의 굽힘 하중에서 3점 굽힘 하중에 의한 물체의 X방향 변위 변화가 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 중립면을 기준으로 상부와 하부에 압축과 인장의 효과가 복합적으로 나타나며, 중앙치구 부분에서 응력이 집중되기 때문이다. Fig. 11은 35 kgf 이상의 굽힘 하중에 의한 X 방향 변형률을 나타낸 그림으로서, 굽힘 하중에 의한 인장과 압축의 효과로 인하여 중앙 치구의 부분에서 발생하는 응력의 집중 현상을 보다 명확히 구분할 수 있다.

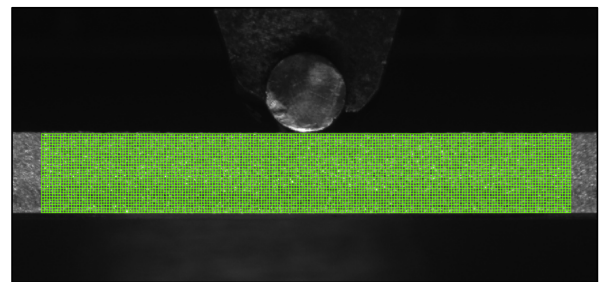


Fig. 8 Illustration of Virtual grid for measurement of the deflection on the reference image

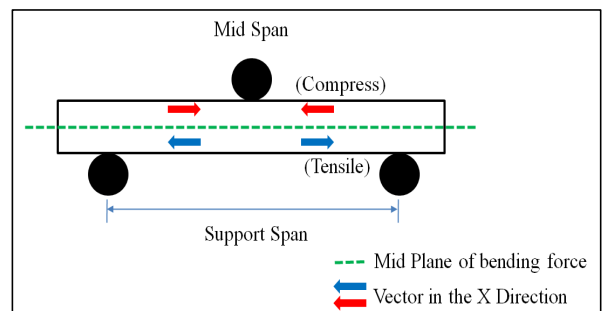


Fig. 9 Illustration of X-direction deformation by 3 point bending loads



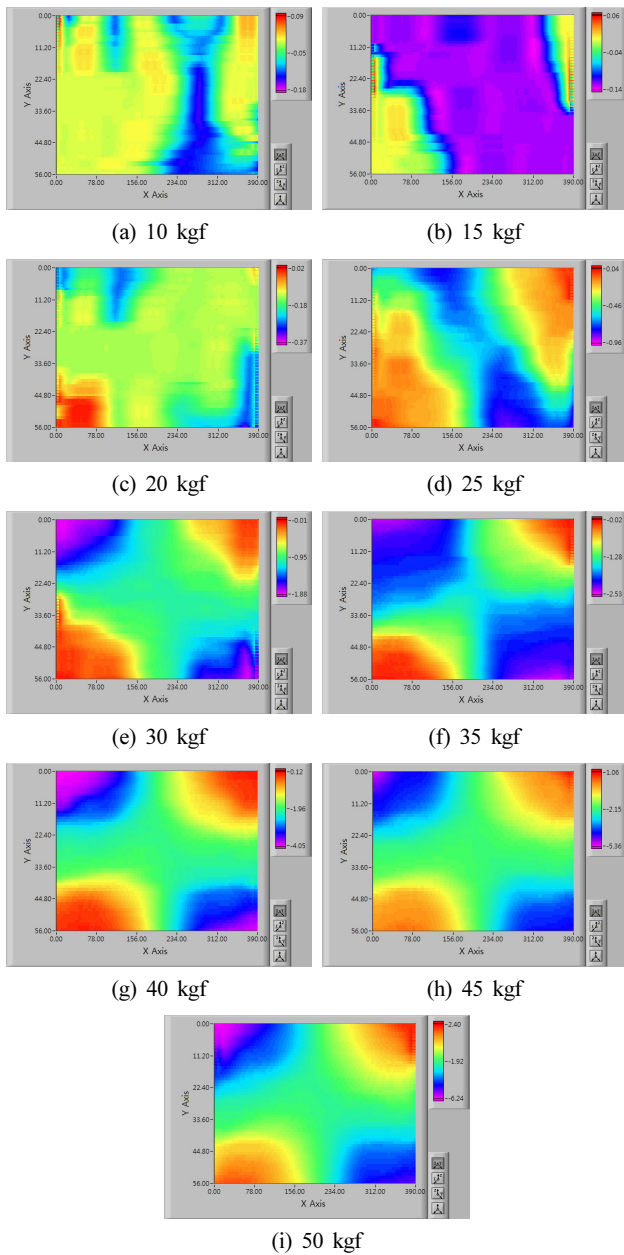


Fig. 10 Illustration of X-direction displacements by 3 point bending loads

#### 4.3 굽힘 하중에 의한 Y방향 처짐량 및 휨 변형률

3점 굽힘 시험의 경우, 하중이 작용하는 중앙 치구에서 가장 큰 처짐량이 발생하게 된다. 따라서 만능 시험기의 경우, 중앙 치구의 변위량을 이용하여 3점 굽힘 하중에 의한 물체의 처짐량 및 휨 변형률을 계측한다.

그러나 이미지 상관법을 이용한 계측 방법의 경우, 하중에 의한 물체의 변형 전, 후의 이미지의 상관관계를 이용하여 변위를 계측하기 때문에 픽셀단위의 결과 값을 갖게 된다. 또한 중앙 치구 부분 뿐만 아니라 사용자가 입력한 각각의 부분에 대한 처짐량이 하나의 지도 형태로 계측된다. 그러므로 1픽셀이 표현하는 실제거리들이 이

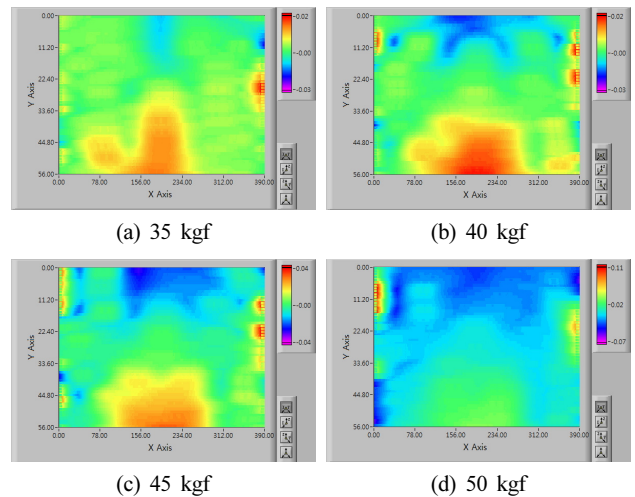


Fig. 11 Illustration of X-direction strain by 3 point bending loads

Table 2 Deflection results using the each measurement methods

Load (kgf)	Universal Test Machine (mm)	DIC (mm)	Error rate (%)
10	0.0650	0.0645	-0.77
15	0.1160	0.1150	-0.86
20	0.2010	0.2027	0.85
25	0.3665	0.3666	-0.11
30	0.7605	0.7639	0.38
35	1.3820	1.4072	1.82
40	2.2580	2.3087	2.26
45	2.9275	2.9839	1.93
50	4.0895	4.1763	2.22

용하여 픽셀단위의 처짐량을 실제 거리로 변환하였으며, 최대 처짐량을 이용하여 만능 시험기와 오차를 분석하였다.

Table 2는 만능시험기와 이미지 상관법을 이용하여 측정된 3점 굽힘 하중에 의한 알루미늄 6061 시편의 처짐량과 그에 따른 오차를 분석한 결과를 나타낸 표이다. 표에서 보듯 이미지 상관법을 이용한 계측 방법과 만능 시험기의 계측 결과를 비교한 결과 3% 미만의 오차를 나타내었다. Fig. 12는 이미지 상관법을 이용하여 측정된 물체의 처짐량을 나타낸 그림으로서, 굽힘 하중에 의한 처짐량이 픽셀단위로 표현되어 있다. Table 3은 만능 시험기와 이미지 상관법을 이용하여 측정된 알루미늄 6061 시편의 처짐량을 식 (4)을 적용하여 휨 변형률을 계산한 결과를 나타낸 표이며, Fig. 13은 시편에 작용하는 굽힘 응력과 휨 변형률의 관계를 나타낸 그래프이다.

## 5. 결론

이미지 상관법을 이용한 계측 방법은 외력에 의한 물체의 변형 전, 후 이미지의 상관관계를 비교하여 비접촉 방식으로 물체의 변

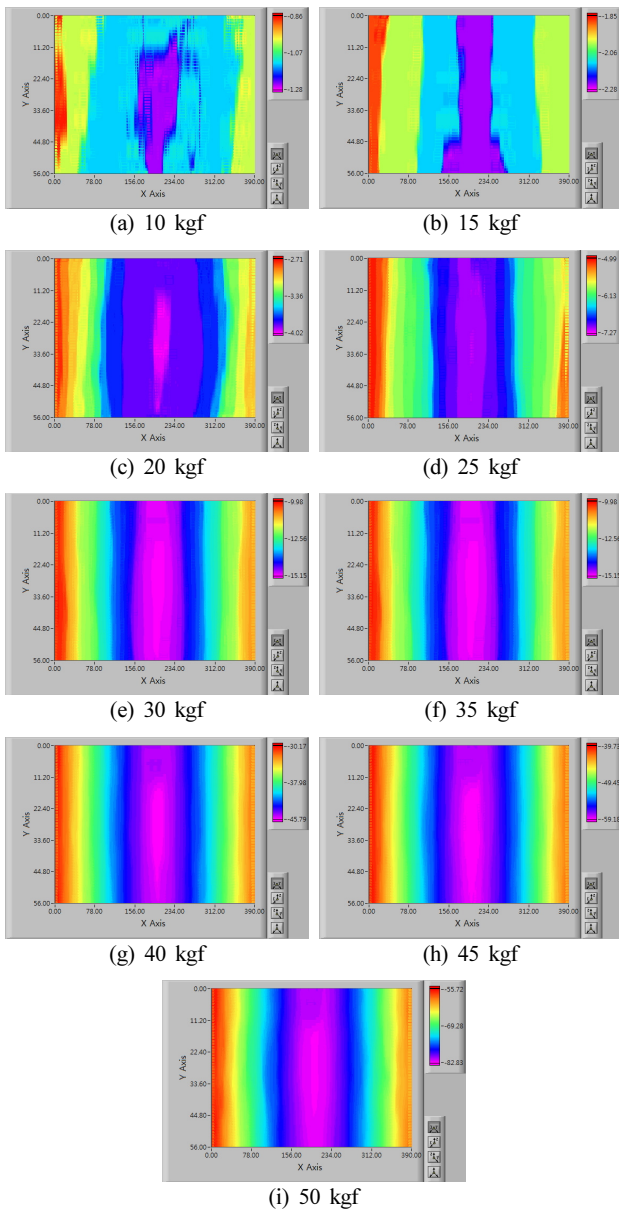


Fig. 12 Illustration of Y-direction deflection by 3 point bending loads

Table 3 Flexural strain results using each measurement methods

Stress (MPa)	Universal Test Machine Flexural Strain (%)	DIC Flexural Strain (%)
16.3	0.0234	0.0232
24.5	0.0418	0.0414
32.7	0.0724	0.0730
40.8	0.1319	0.1320
49.0	0.2738	0.2750
57.2	0.4975	0.5066
65.3	0.8129	0.8311
73.5	1.0539	1.0742
81.7	1.4722	1.5035

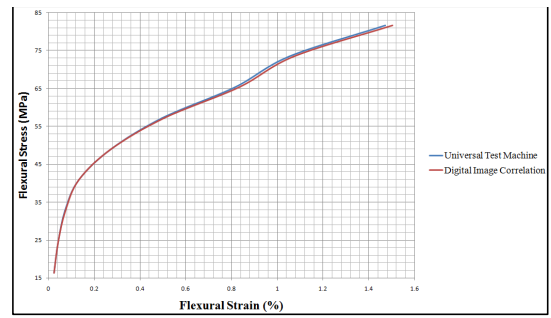


Fig. 13 Flexural stress and strain curve each measurement methods

위 및 변형률을 측정할 수 있는 장점을 갖고 있다. 또한 이미지의 각각의 지점에 대한 변위 및 변형률의 측정이 가능하여 외력에 의한 물체의 응력 분포 및 결합의 진전 모드의 측정이 가능하다. 본 논문에서는 이미지 상관법 계측 시스템을 이용하여 알루미늄 6061 시편의 3점 굽힘 하중에 의한 처짐량과 휨 변형률을 측정하였다. 또한 만능 시험기와 이미지 상관법을 이용한 계측 방법의 결과를 비교하여 이미지 상관법을 이용한 계측 방법의 신뢰성을 확보하기 위한 연구를 진행하여 다음과 같은 결론을 확보할 수 있었다.

이미지 상관법을 이용하여 알루미늄 6061 시편의 3점 굽힘 하중에 의한 처짐량의 측정이 가능하였다. 또한 이미지 상관법을 이용한 계측 결과와 만능 시험기를 이용한 계측 결과와의 오차 분석을 통하여 3%미만의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

이미지 상관법을 이용한 계측 결과의 경우, 시편의 각각의 지점에 대한 변위 변화를 하나의 지도 형태의 나타낼 수 있어 3점 굽힘 하중에 시편의 인장과 압축 하중의 작용 양상을 측정할 수 있었다. 또한 이미지 상관법을 이용하여 계측한 3점 굽힘 하중에 의한 최대 처짐량을 이용하여 휨 변형률의 측정이 가능하였다.

복합 재료 및 세라믹 재료의 경우, 취성의 성질로 인하여 인장 시험을 대신하여 3점 또는 4점 굽힘 시험을 수행한다. 따라서 이러한 분야에 이미지 상관법을 적용할 경우 비접촉 방식으로 처짐량 및 휨 변형률의 측정이 가능하며, 굽힘 시험에 따른 인장과 압축 하중의 작용으로 인한 물체의 거동 측정이 가능할 것으로 예상된다.

## 후기

이 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20131520100760).

## References

[1] Oh, H. K., Kim, S. T., Kang, J. W., 2013, A Study of the Strain

- Measurement for Al 6061-T6 Tensile Specimen using the Digital Image Correlation, *Journal of the Korean Society of Safety* 28:4 26-32.
- [2] David, C., Metteo, A., Lori, G. B., Surendra, S., 2007, Digital image correlation analysis of interfacial debonding properties and fracture behavior in concrete, *Engineering Fracture Mechanics* 74:1 109-212.
- [3] Bing, P., Kema, O., Huimin, X., Anand, A., 2009, Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacements and strain measurement : a review, *Measurement Science and Technology* 20:6 1-17.
- [4] Bing, P., Wu, D., Xia, Y., 2012, Incremental calculation for large deformation measurement using reliability-guided digital image correlation, *Optics and Lasers in Engineering* 50:4 586-592.
- [5] Hongjian, S., Hongwei, J., Coubiao, Y., Xiaoyuna, H., 2013, Shape and deformation measurement system by combining fringe projection and digital image correlation, *Optics and Laser in Engineering* 51:1 47-53.
- [6] Helm, J. D., 2008, Digital Image Correlation for Specimens with Multiple Growing Cracks, *Society for Experiment Mechanics* 48:6 753-762.
- [7] Pan, B., We, D., Xia, Y., 2012, An active imaging digital image correlation method for deformation measurement insensitive to ambient light, *Optics and Laser in Engineering* 44:1 204-209.
- [8] ASTM D 790, 2010, Standard Test Methods for Flexural Property of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM-ASTM International, United States of America.