

사질토의 변형 측정을 위한 최적의 디지털 이미지 해석 기법

An Optimal Digital Image Analysis Technique for Measuring Deformation of Granular Soils

장 의 룡¹ Jang, Eui-Ryong

정 영 훈² Jung, Young-Hoon

정 충 기³ Chung, Choong-Ki

Abstract

To measure the soil deformation, two common techniques of the digital image analysis—Particle Image Velocimetry (PIV) and Digital Image Correlation (DIC)—have been used. To generally apply these techniques to the soils, the accuracy of these techniques should be evaluated under various conditions. In this study, the influence factors including the image resolution, the degree of displacement and deformation, the size of pixel subsets, and analysis techniques were analyzed. The deformation of an idealized particle assembly using the discrete element method was measured by the digital image analyses, and then the results were compared with the actual deformations. To conduct the optimal digital image analysis, various factors are systematically analyzed in terms of the degree of the displacement and the deformation.

요 지

흙의 변형을 측정하기 위해 적용되는 이미지 해석 기법으로는 Particle Image Velocimetry(PIV)와 Digital Image Correlation(DIC)가 있으며, 이 기법들이 더욱 널리 활용되기 위해서는 각 기법에 따라 다양한 조건에서 정밀도를 평가하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이미지 해상도, 변위 및 변형 정도, 픽셀 집합의 크기 및 해석 기법의 다양한 요소를 고려하여 사질토의 변형을 관찰하기에 적합한 최적의 이미지 해석 기법을 제시하고자 한다. 개별요소법(DEM)을 이용하여 구성된 가상의 사질토 이미지를 활용하여 이미지 해석을 행하고 변위를 산정한 후, 개별 요소법의 변위와 비교하였다. 각 영향 요소들이 정확도에 미치는 영향을 분석하였고, 변위 및 변형 정도에 따라 최적의 이미지 해석 조건을 제시할 수 있었다.

Keywords : Digital image analysis, Granular soil, Deformation measurement, Discrete element method

1. 서 론

흙의 거동 특성을 파악하기 위한 실내시험에서는 그 목적에 따라 다양한 계측 장비가 활용된다. 특히, 시료의 변

형 측정은 모든 시험에서 기본적으로 이루어지며, 두 지점 사이의 상대적 변위 차이를 측정하는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 시료에서 유출 혹은 유입되는 유량으로 부피변화를 측정하는 장비가 대표적으로 이용

1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Eng., Seoul National Univ., er1216@snu.a.kr, 교신저자)

2 정희원, 경희대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Kyung Hee Univ.)

3 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environ. Eng., Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

된다. 삼축시험의 경우에는 시료 중앙 부분에서의 미소 변형을 측정하기 위하여 국부 LVDT, 근접계(proximity transducer), 경사계(inclinometer), 홀 이펙트 게이지(hall effect gauge) 등도 변위 측정에 사용된다. 그러나 이러한 변위 측정 장비는 임의로 정한 두 점 사이의 상대 변위만 측정할 수 있으며, 다양한 위치에서의 변위 및 전체 시료의 평균적인 변위를 구하는 것은 불가능하다. 유량으로 측정하는 부피 변화는 시료 전체의 평균적인 변형만 알 수 있을 뿐 국부적인 계측을 할 수가 없다.

일반적인 변형 측정 장비 외에도 시료 내부의 다양한 위치에서 변형 특성을 관찰하기 위한 목적으로 몇 가지 기법들이 적용되고 있다. 시험 중에 시료를 관찰하고자 하는 시점에서 시료 내부에 에폭시를 주입하여 굳힌 후 절단하여 살펴본 사례가 있다(Alshibli와 Sture, 1999; Wong, 2000). 이 기법들은 원하는 단면에서 입자의 배열 형상을 쉽게 관찰할 수 있지만, 시료의 관찰이 일회적이라는 단점이 있다. X선 단층 촬영(CT-Computed Tomography)을 활용하여 시료 내부의 밀도를 파악하고, 이로부터 변형 거동을 관찰한 연구도 있다(Desrues et al., 1996; Alshibli et al., 2000). X선 단층 촬영을 활용하면 하나의 단면이 아닌 여러 단면에서의 밀도 분포를 파악하여 시료 전체의 간극비 분포를 산정할 수 있다. 그러나 X선 감쇠 데이터로부터 밀도를 산정해야 하는 어려움이 있으며, 고가 장비의 사용을 필요로 한다는 단점이 있다. 뿐만 아니라 X선 촬영을 위해서는 시험을 중단하고 스캐너에 위치시켜야 한다.

시료의 변형을 보다 간편하게 측정하며 기존의 문제점들을 해결하기 위해서 평면 상에서 변형하는 시료의 변위를 직접 측정하는 디지털 이미지 해석 기법이 활용되고 있다. 이미지 해석을 활용한 초기 연구는 시료 외부의 멤브레인에 격자를 그린 후 전단에 따라서 변화하는 이미지를 추적하여 이루어져 왔다(Liang 등, 1997; Alshibli와 Sture, 1999). 이 때의 이미지 해석은 제한된 측정점을 이용하여 수작업으로 진행되기 때문에 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 시료 전체 변형을 세밀하고 정확하게 측정하기 어렵다. 최근에는 컴퓨터의 발달과 디지털 카메라의 고급화 등으로 자동화된 디지털 이미지 프로세싱 기술이 여러 분야에 널리 활용되고 있으며, 토질 역학 분야에서도 적용되고 있다(White 등, 2003; Rechenmacher 등, 2004; 장의룡 등, 2008). 이로써, 변형 측정을 원하는 시점의 시료 사진을 활용하여, 손쉽게 다양한 위치에서의 변위를 구할 수 있으며, 이 변위장으로부터 변형 분포를 파악할 수 있다.

흙의 변형을 측정하기 위해 적용되는 이미지 해석 기법

으로는 Particle Image Velocimetry(PIV)와 Digital Image Correlation(DIC)가 있다. 이미지 해석 기법이 더욱 널리 활용되기 위해서는 각 기법에 따라 다양한 조건에서의 정밀도를 평가하는 연구가 필요하다. White 등(2003)과 Rechenmacher 등(2004)은 시료에 일정한 변위(Rigid Body Motion)를 주고, 각각 PIV와 DIC 기법으로 이미지 해석을 수행하여 적용성을 검증하고 정확도를 확인하였다. 그러나 이미지 해석에 영향을 미칠 수 있는 이미지 해상도는 고려하지 않았고, 시료는 변위만 발생시켰으며 압축 혹은 전단 변형 등이 일어난 경우에 대해서는 검증을 수행하지 않았다. 따라서 다양한 이미지 해상도 및 시료의 변형 조건을 고려한 이미지 해석 기법의 포괄적 검증이 필요한 실정이다.

PIV와 DIC를 비교하여 흙의 변형 측정에 적합한 이미지 해석 기법을 선정할 필요가 있다. PIV는 유체역학 분야에서 유체 흐름을 따라 이동하는 물체의 움직임을 찾는 데 활용되었으며, DIC는 고체역학 분야에서 물체의 변형을 관측하는데 활용되었다. 이렇듯, PIV와 DIC가 근본적인 차이가 있음에도 불구하고, 이 두 방법을 직접 비교 평가한 연구는 이루어지지 않았다. 특히 사질토와 같이 입자로 이루어진 시료는 개별 입자의 관점에서는 변위만 발생하는 강제 운동을 하지만 전체적인 입자 집합으로 보면 압축, 인장, 전단 변형이 발생한다. 그러나 개별 입자 집합을 연속체로 볼 수도 없으므로, 사질토에 이미지 해석을 적용하기 위해서는 적합한 이미지 해석 기법 및 조건이 제안되어야 한다.

본 연구에서는 이미지 해상도, 변위 및 변형 정도, 해석 기법 등과 같이 이미지 해석 기법에 영향을 미치는 다양한 요소를 고려하여 사질토에 적합한 최적의 이미지 해석 기법을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 수치적으로 개별 입자를 모사하는 개별요소법을 이용하여 정확한 변위를 알고 있는 가상 입상체의 변형을 모사하였고, 해석 중에 입자들의 이미지를 다양한 해상도로 캡처하였다. 이 이미지들을 활용하여 이미지 해석을 수행하여 변위를 산정한 후, 개별 요소법의 변위 결과와 비교하도록 한다.

2. 디지털 이미지 해석 기법

2.1 디지털 이미지 해석 기법의 개요

디지털 이미지를 활용한 해석 기법은 여러 분야에서 관찰하고자 하는 대상 물체의 변위 및 변형을 측정하기 위하여 이용되고 있다. 토질 역학의 분야에서도 PIV와 DIC 기법들이 시료의 변형 측정을 위하여 적용되고 있다. 디지털

이미지 해석을 수행하기 위해서는 몇 가지 조건이 필요하며 그 내용은 다음과 같다.

- (1) 관찰되는 대상은 굴곡이 없는 평면이어야 하며, 평면 상에서만 이동, 변형해야 한다.
- (2) 카메라는 촬영하는 방향은 대상 평면과 수직을 이루어야 한다.
- (3) 조명은 균일하게 주어져야 한다.

이러한 조건은 평면변형을 시험에서 가장 적절하게 만족시킬 수 있으며, 이를 근거로 최근에 평면변형률 시험에 디지털 이미지 해석 기법을 적용한 사례가 있다 (Rechenmacher 등, 2004; 장의룡 등, 2008). 그리고 모형 토조 시험에서도 관찰하는 면을 평면으로 하여 디지털 이미지 해석 기법을 적용한 다양한 연구가 이루어지고 있다(Zhang 등, 2005; Leung 등, 2008).

서로 다른 이미지 해석 기법들은 알고리즘에 차이는 있지만 서로 다른 시간에 촬영된 두 개의 디지털 이미지를 이용하여 픽셀 집합(pixel subset)들의 상관성으로 상대적인 변위를 측정한다는 공통점을 가지고 있다. 이때, 디지털 이미지는 일반적으로 흑백 사진으로 변환되며, 각 픽셀은 0부터 255까지의 레벨로 구분되는 명암을 갖게 된다. 변형 전 이미지의 임의의 위치에서 변위를 구할 때에 하나의 픽셀을 사용하지 않고 임의의 명암 패턴을 가지는 픽셀 집합을 활용하여 변형 후의 이미지에서 가장 유사한 위치를 찾는 것이다. 이때에 개별 픽셀이 사용되지 않고, 픽셀 집합을 사용하는 것은 유일성을 확보하기 위함이다. 그림 1과 같이 픽셀 집합의 크기가 커짐에 따라서 명암 패턴은 더욱 명확해지며, 변형 후 이미지에서 하나의 가장 유사한 패턴을 가질 확률이 높아지게 된다. 그러나 픽셀 집합이 너무 커지게 되면 위치에 따른 변위 차이를 표현할 수 없기 때문에 적절한 크기의 픽셀 집합을 사용하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 PIV와 DIC 두 기법의 사실투에 대한 적용성을 비교 평가하기 위하여 각각의 방법을 직접 프로그래밍화하여 연구를 수행하였다.

2.2 PIV(Particle Image Velocimetry)

PIV는 유체역학 분야에서 흐르는 유체에 이동하는 물

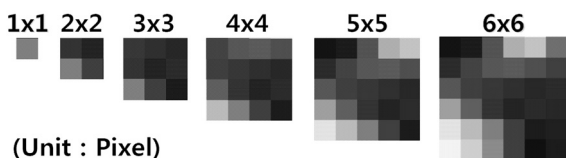


그림 1. 픽셀 집합 크기에 따른 명암 패턴

체의 변위, 속도를 측정하기 위하여 개발되어 사용되었다 (Adrian, 1991). 변형 전의 이미지에서 변위를 구하고자 하는 위치에서 픽셀 집합을 선택하고, 선택된 픽셀 집합의 예상 변위를 고려하여 예측되는 이미지의 이동 범위를 결정한다. 변형 전의 픽셀 집합을 변형 후 이미지의 예측 범위 내에서 1픽셀 단위로 이동하면서 그림 2와 같이 크로스 코릴레이션(cross-correlation)을 수행한다. 이 때 상관 계수 값 C 는 식 (1)과 같이 구해진다.

$$C = \frac{\sum [F \cdot G]}{(\sum F^2 \times \sum G^2)^{1/2}} \quad (1)$$

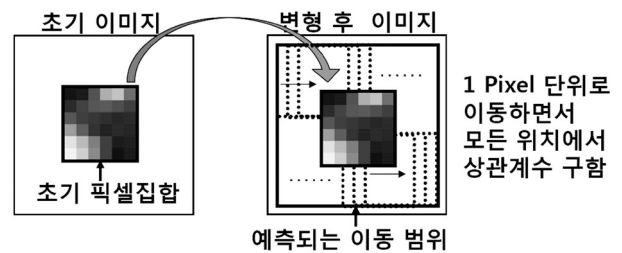


그림 2. PIV 기법에서 수행하는 크로스 코릴레이션

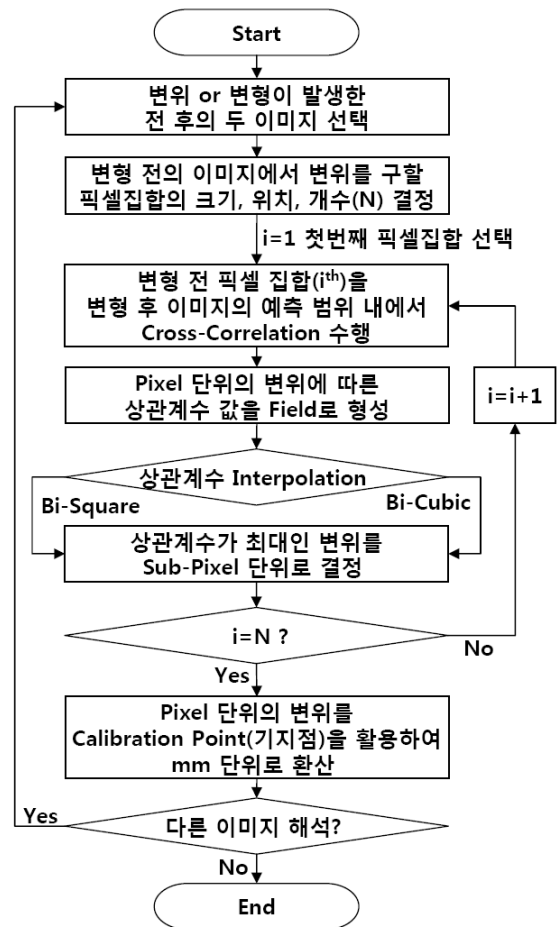


그림 3. PIV기법을 적용하여 변위를 측정하는 흐름도

여기서 F와 G는 변형 전, 후의 픽셀 집합에서 명암 값의 행렬이다. 예측 범위 내에서 구해진 1 픽셀 단위의 변위에 따른 상관계수 값을 장(field)으로 표현할 수 있다. 이 상관 계수장을 보간하여 최대의 상관 계수 값을 가지는 변위를 서브 픽셀 단위로 구할 수 있다(White 등, 2003). 본 연구에서는 2차와 3차의 Bi-square 및 Bi-cubic 보간 기법을 각각 적용하였으며, 서브 픽셀의 해상도는 0.0001 픽셀로 하였다. 위의 알고리즘을 그림 3에 요약된 절차처럼 여러 픽셀 집합에 대하여 적용하여 원하는 대상의 여러 위치에서 변위를 얻어낼 수 있다.

2.3 뉴턴-랩슨법을 이용한 DIC(Digital Image Correlation)

DIC 기법은 고체역학 분야에서 변형을 관찰하기 위한 목적으로 다양하게 개발되어 적용되어 왔다(Sutton 등, 1988; Bruck 등, 1989; Vendroux와 Knauss, 1998; Hung과 Voloshin, 2003). 변형 전의 이미지에서 변위를 구하고자 하는 위치에서 픽셀 집합을 선택한다는 점에서 DIC는 PIV와 동일하지만, DIC에서는 크로스 코릴레이션을 수행하지 않고, 초기 픽셀 집합의 변위 및 변형을 $P = \left\{ u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y} \right\}$ 을 가정한다. u 와 v 는 픽셀 집합 중심의 변위이며, $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$ 은 변형도로서 위치에 따른 변위의 변화를 나타낸다. 변형도를 DIC에서 고려하게 되면 그림 4와 같이 픽셀 집합의 모양이 변하는 것을 고려할 수 있게 된다. 초기 픽셀 집합의 변형 후 위치를 다음 식 (2)와 같이 결정한다.

$$x_k^* = x_i + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x_k + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y_k, \quad y_k^* = y_i + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x_k + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y_k \quad (2)$$

여기서 (x_k, y_k) 는 변형 전 픽셀 집합들의 좌표 값이며, (x_k^*, y_k^*) 은 (x_k, y_k) 이 이동된 변형 후 픽셀 집합의 좌표 값이다. Δx_k 와 Δy_k 는 픽셀 집합 중심에서 (x_k, y_k) 좌표까지의 거리이다. 구해진 좌표 값을 이용하여 변형 전 후의 픽셀 집

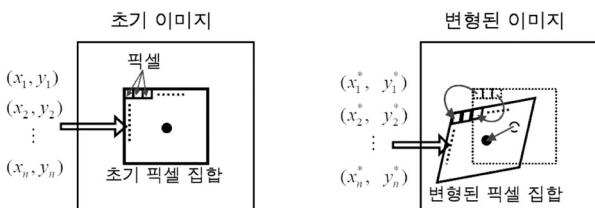


그림 4. DIC 기법에서 고려될 수 있는 픽셀 집합의 변형

합의 상관계수는 식 (3)과 같이 정의 될 수 있다.

$$C = \frac{\sum_k [F(x_k, y_k) - G(x_k^*, y_k^*)]^2}{\sum_k [F(x_k, y_k)]^2} \quad (3)$$

여기서 $F(x_k, y_k)$ 은 초기 픽셀 집합 (x_k, y_k) 좌표에 해당하는 픽셀의 명암 값이며, $G(x_k^*, y_k^*)$ 은 이동, 변형된 픽셀 집합의 (x_k^*, y_k^*) 에서의 명암 값이다. 여기에서 (x_k^*, y_k^*) 값이 정수로 주어지지 않을 경우에는 서브 픽셀 수준에서 명암 값을 구해야 하는데, 상관계수를 보간해야 하는 PIV와는 달리 DIC 기법은 이미지의 명암 값을 보간한다. 본 연구에서는 이미지의 보간 기법 중에 가장 널리 사용되는 Bi-cubic 보간법을 사용하였다. 또한 식 (3)은 식 (1)과는 달리 오차의 형태로 계산되므로, 값이 작을수록 상관도가 높게 평가 된다.

본 연구에서는 식 (3)의 C값을 최소화 하기 위해 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 기법을 사용하여 ΔP 를 계산하고

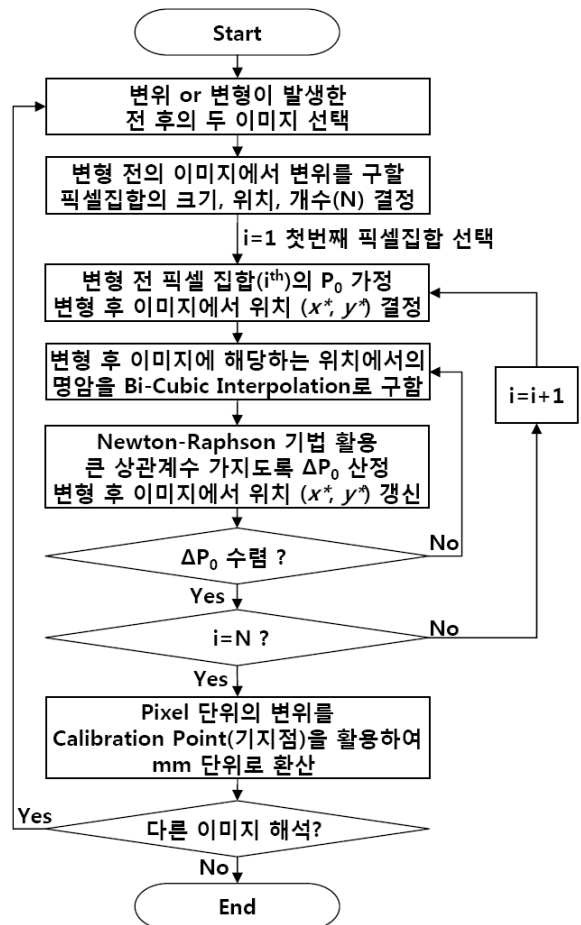


그림 5. DIC 기법을 적용하여 변위를 측정하는 흐름도

표 1. 개별요소법을 이용하여 모사한 전체 시료에 대한 이동 및 변형

	이동(translation)	변형(deformation)	시험명
강체 운동 (Rigid Body : RB)	D 0.1mm D 0.3mm D 1.0mm	-	D0.1RB D0.3RB D1.0RB
압축 변형 (Compression : CP)	D 0.3mm	CP 0.5% CP 1.5% CP 5.0%	D0.3CP0.5 D0.3CP1.5 D0.3CP5.0
전단 변형 (Shear : SH)	D 0.3mm	SH 0.5% SH 1.5% SH 5.0%	D0.3SH0.5 D0.3SH1.5 D0.3SH5.0

P (변위 및 변형률)를 재산정하여 수렴할 때까지 반복 계산을 수행하였다(Bruck 등, 1989; Vendroux와 Knauss, 1998). 또한 P에서 변위만을 고려하고 $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$ 을 0 으로 고정한 DIC 해석도 병행하여 비교하였다. DIC는 그림 5에 요약된 절차와 같이 여러 픽셀 집합에 대하여 적용하여 대상의 다양한 위치에서 변위를 얻어낼 수 있다.

3. 디지털 이미지 해석 조건 및 절차

3.1 개별요소법 개요 및 해석 조건

개별요소법은 개별 입자간의 접촉 거동을 수치적으로 모사하고 이로부터 입상체의 평균적인 응력 및 변형률의 변화를 구하는 기법이다. 개별요소법의 해석은 Cundall과 Strack(1979)가 제시한 외재적 유한 차분 해석절차를 사용하게 되며, 입자의 위치 변화를 추적하기 위해 뉴턴의 제2법칙과 접촉점에서의 힘-변위 관계를 반복적으로 계산하게 된다. 본 연구에서는 정확한 변위값을 알고 있는 이미지를 획득하기 위한 목적으로 2차원 개별요소법을 사용하였다. 사용된 입상 시료의 크기는 20mm x 20mm으로 강성 벽체 내부에 0.8~1.2mm 직경의 원형 입자 약 450개가 성형되었다.

성형된 시료에 강성 벽체를 움직여서 그림 6와 같이 변형 없이 이동만 하는 강체 운동, 연직 방향 압축(횡방향 팽창), 그리고 횡방향 전단 3가지 형태로 변화를 주었다.



그림 6. 시료에 가한 3가지 형태의 변화

표 2. 개별요소법 시험에서 캡처한 이미지 해상도 및 특성

해상도(Resolution)	Pixels/mm	Pixels/ D_{50}
150 x 150 pixels	5.0	5.0
300 x 300 pixels	10.0	10.0
600 x 600 pixels	20.0	20.0

* $D_{50} = 1.0\text{mm}$

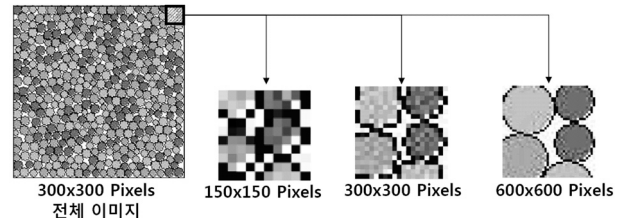


그림 7. 성형된 시료의 전체 이미지 및 해상도에 따른 동일 영역의 이미지

시료에 가한 변위 및 변형을 정리하면 표 1과 같다. 이와 같이 이루어진 시험들에 대해서 모두 세 가지 해상도의 이미지를 얻었으며 각 이미지 크기는 표 2와 같이 정리될 수 있다. 그리고 이미지 해상도에 따라 동일 영역의 이미지를 그림 7에 나타내었다.

3.2 이미지 해석 조건

본 연구에서는 개별요소법(DEM)으로부터 구해진 시료 성형 직후의 이미지를 변형 전 이미지로, 표 1에 정리된 이미지를 변형 후 이미지로 선택하여 이미지 해석을 수행하였다. 이때 픽셀 집합의 개수는 총 4개로 한정하였다. 변형 전의 각 픽셀 집합은 이미지의 크기에 따라 표 3에 나타난 바와 같이 4가지 크기로 변화시켰다. 이미지 해상도에 따라 적절한 픽셀 집합의 크기를 선정하여 4종류의 픽셀 집합의 실제 크기와 그 안에 들어가는 입자의 개수가 해상도에 관계없이 거의 일정하도록 정하였다. 각 픽셀 집합이 포함하는 입자의 개수를 표 3에 함께 정리하였다. 4

표 3. 이미지 해상도에 따른 4종류의 픽셀 집합의 크기

이미지 해상도 (pixels)	4종류의 픽셀집합의 크기				
	(pixels) (mm x mm) (particles/ subset)	5x5 1.0x1.0 1	11x11 2.2x2.2 6	25x25 5.0x5.0 27	51x51 10.2x10.2 112
150x150	(pixels) (mm x mm) (particles/ subset)	11x11 1.1x1.1 1	25x25 2.5x2.5 7	51x51 5.1x5.1 28	101x101 10.1x10.1 111
300x300	(pixels) (mm x mm) (particles/ subset)	25x25 1.25x1.25 1	51x51 2.55x2.55 7	101x101 5.05x5.05 27	201x201 10.05x10.05 110

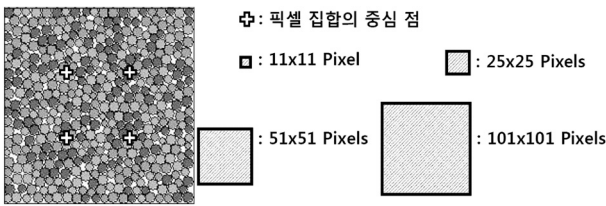


그림 8. 300x300 픽셀 해상도의 이미지에서 4개의 픽셀 집합의 중심 점과 해석에 사용되는 4개의 픽셀 집합 크기

개의 픽셀 집합 중심점 위치와 4 종류의 픽셀 집합의 크기는 그림 8에 도시하였다.

이미지 해석을 수행하는 기법은 앞서 언급한 바와 같이 PIV와 DIC를 사용하였다. PIV의 경우에는 상관계수를 보간(interpolation)할 때 Bi-square와 Bi-cubic 보간법 두 가지를 적용하였다. DIC에서는 변형률을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우 두 가지로 나누어 해석을 수행하였다. 따라서 시료의 이동 혹은 변형에 대한 9 가지 경우, 3 가지 종류의 이미지 해상도, 이미지 해석에 사용된 픽셀 집합의 4 가지 조건, 그리고 이미지 해석의 4 가지 방법에 대해 총 432회의 이미지 해석을 수행하였다.

3.3 기준 변위 산정 방법

이미지 해석으로 구한 결과의 정확도를 검증하기 위해서는 실제 정확한 변위 값을 알고 있어야 한다. 개별요소법을 이용하므로 이동 및 변형이 발생한 시료 내 모든 입자들의 변위를 정확히 추적할 수 있다. 이미지 해석에서 구해진 픽셀집합의 변위는 실제 픽셀 집합 내부에 있는 입자의 변위로 평가되어야 한다. 픽셀 집합 내 입자들은 시료가 변형 없이 이동만 할 경우에는 모두 동일한 변위를 가질 수 있지만, 시료가 변형이 발생할 경우에는 입자들이 서로 다른 변위를 가진다.

이미지 해석에서는 픽셀 집합 중심에서의 변위를 구하

기 때문에 실제 변위도 픽셀 집합 중심에서의 변위를 산정해야 한다. 이를 위해서 픽셀 집합 내부 입자들의 변위를 활용하여 최소 자승 오차법으로 식 (4)의 i 번째 픽셀 집합의 선형 변위장 (u^i, v^i)을 구하였다. 물론 고차의 변위장을 사용할 수도 있으나, 시료 전체에 동일한 크기의 변형을 가하였으므로 1차의 선형 변위장으로도 충분하다고 판단하였다. 변형 전 픽셀 집합 중심의 좌표를 식 (4)에 대입하여 구한 변위를 픽셀 집합 중심에서의 변위로 결정하였다.

$$u^i = a_u^i x + b_u^i y + c_u^i, \quad v^i = a_v^i x + b_v^i y + c_v^i \quad (4)$$

4. 디지털 이미지 해석 결과

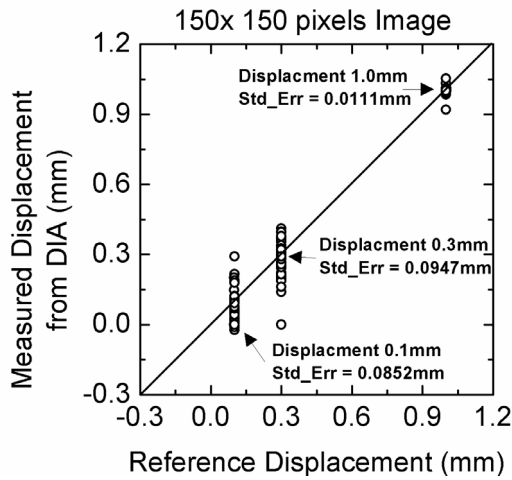
이미지 해석 결과의 정확도를 평가하기 위해서는 실제 변위와 차이를 정량적으로 평가하여야 한다. 개별 픽셀 집합에 대한 변위 차이를 개별적으로 비교 평가하는 것도 가능하지만, 이미지 해상도, 변위 및 변형 정도, 픽셀 집합의 크기 및 해석 기법과 같이 다양한 요소들이 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위해서 표준 오차의 개념을 이용하였다. 즉 식 (5)와 같이 특정 해석 조건에서 구해진 N 개의 변위 (u_{DIA}, v_{DIA})와 DEM으로 구한 변위 (u_{DEM}, v_{DEM})를 이용하여 표준오차(Std_Err)를 구하였다.

$$Std_Err = \sqrt{\frac{\sum_i^N [(u_{DIA} - u_{DEM})^2 + (v_{DIA} - v_{DEM})^2]}{N}} \quad (5)$$

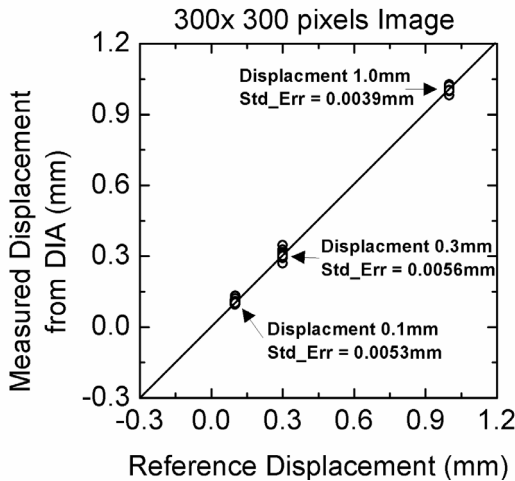
4.1 강제 운동을 하는 시료의 이미지 해석 결과

변형이 존재하지 않고 변위만 발생하는 강제 운동에 대하여 이미지 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 세 가지 이미지 해상도에서 기준 변위와 이미지 해석으로 측정된 변위 분포를 그림 9에 도시하였다. 각 그래프마다 이미지

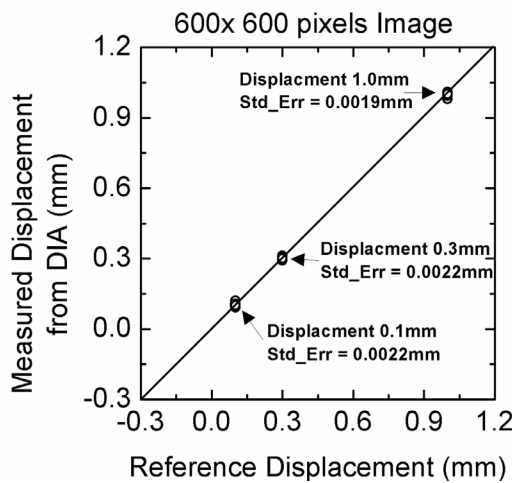
해상도 외의 다양한 조건에서 구해진 192개의 픽셀 집합 중심점의 변위가 사용되었다. 강제 운동이기 때문에 식 (4)



(a) 150x150 픽셀 이미지 활용한 이미지 해석으로 측정된 변위 분포



(b) 300x300 픽셀 이미지 활용한 이미지 해석으로 측정된 변위 분포



(c) 600x600 픽셀 이미지 활용한 이미지 해석으로 측정된 변위 분포

그림 9. 이미지 해상도 및 변위에 따른 실제 변위와 이미지 해석으로 측정된 변위 분포

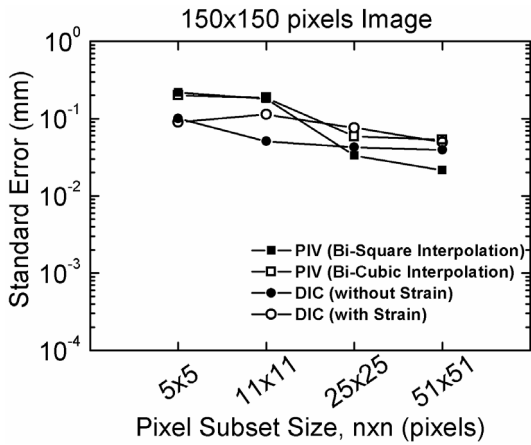
를 사용한 하위 픽셀 집합의 기준 변위도 외부에서 가한 강제 변위 0.1, 0.3, 1.0mm와 동일하다.

해석 결과의 정확도는 이미지 해상도에 따라 큰 차이를 나타낸다. 150x150 픽셀 해상도의 이미지(5픽셀/D₅₀)로부터 구해진 변위의 오차는 다른 두 해상도의 결과에 비하여 매우 크다. 기준 변위가 0.3mm인 경우의 표준 오차는 약 0.1mm이며 최대 오차는 크기는 0.3mm까지 나타낸다. 낮은 해상도의 이미지에서는 입자의 형상이 뚜렷하지 않기 때문에 이미지 해석 결과가 적절히 수렴하지 못하였고, 변위 산정에 큰 오차가 발생하는 것으로 판단된다. 반면에 해상도 300x300 이미지(10 픽셀/D₅₀)에서부터 오차가 급감하고, 해상도가 600x600 픽셀의 이미지 (20 픽셀/D₅₀)에서는 모든 경우 표준 오차가 0.0022mm 이하로 매우 작은 값을 갖는다. 이로부터 이미지 해상도는 이미지 해석에 매우 중요한 요소임을 확인할 수 있다. 입자 이동을 관측하여 적절한 변위를 산정하기 위해서는 유효입경크기의 개별 입자를 최소 10픽셀 이상의 해상도(본 연구에서는 300x300 픽셀 이미지에 해당)로 촬영하여 입자의 형상을 명확히 관찰할 필요가 있다. 더욱 정확한 변위를 측정하기 위해서는 관측하고자 하는 범위에 대해 더 높은 해상도의 이미지를 이용하여야 한다.

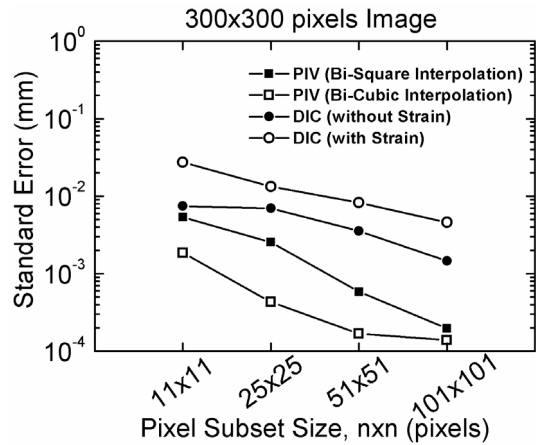
변위에 따른 분포를 살펴 보면 1.0mm의 변위가 발생한 경우에는 다른 작은 변위들과 비교하여 오차가 감소하는 경향이 나타난다. 그러나 150x150 픽셀 해상도의 이미지를 대한 결과를 제외하면 대체적으로 동일 해상도 이미지에서 변위에 따른 오차는 크지 않다.

픽셀 집합의 크기 및 해석 기법의 영향을 살펴 보기 위해서 그림 10과 같이 표준 오차 값을 반대수 그래프에 도시하였다. 그림 10(a), (c), (e)을 살펴보면, 서로 다른 해상도의 이미지에서 동일한 변위가 발생했을 때 표준 오차 분포의 차이를 확인할 수 있다. 그림 10(b), (c), (d)으로부터는 동일 해상도의 이미지에서 변위에 따른 해석 결과 값을 비교할 수 있는데, 변위의 영향은 표준오차 분포에 크지 않음을 알 수 있다.

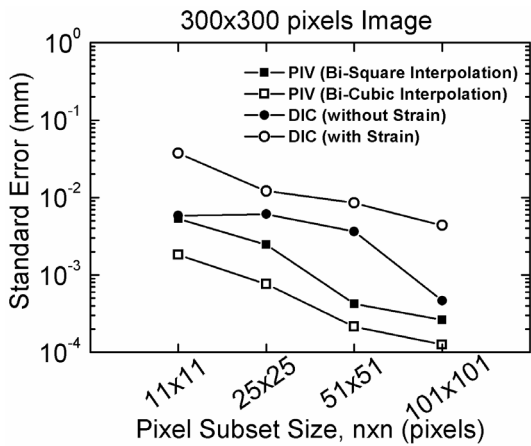
모든 강제 운동의 경우 픽셀 집합의 크기가 증가함에 따라 오차는 감소한다. 즉, 픽셀 집합의 크기가 커짐에 따라 명암 패턴이 명확해지고, 이에 따라 정확도가 증가하기 때문이다. 이미지 해석 기법의 영향을 살펴보면, 150x150 픽셀 이미지 해석 결과를 제외한 모든 경우에 Bi-cubic 보간법을 사용한 PIV이 가장 정확하게 변위를 측정하였다. 가장 큰 픽셀 집합과 Bi-cubic 보간법을 사용하는 PIV를 사용한 경우 표준오차가 약 0.0001mm 수준까지 감소하였다.



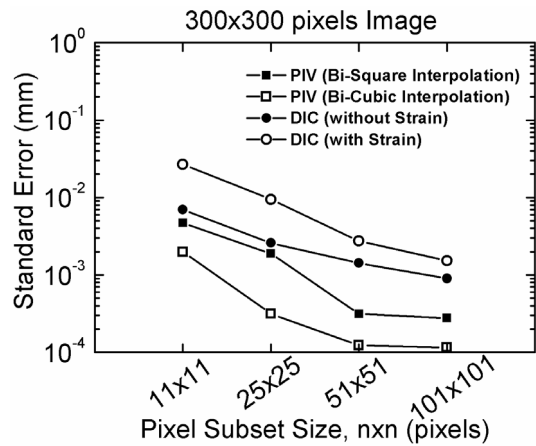
(a) 150x150 픽셀 이미지에서 변위 0.3mm일 때 측정된 변위의 표준 오차 분포



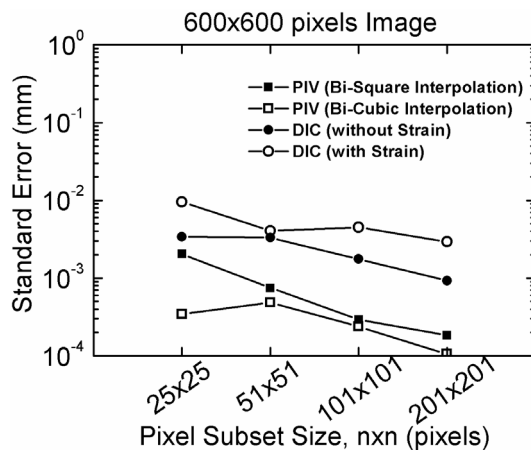
(b) 300x300 픽셀 이미지에서 변위 0.1mm일 때 측정된 변위의 표준 오차 분포



(c) 300x300 픽셀 이미지에서 변위 0.3mm일 때 측정된 변위의 표준 오차 분포



(d) 300x300 픽셀 이미지에서 변위 1.0mm일 때 측정된 변위의 표준 오차 분포



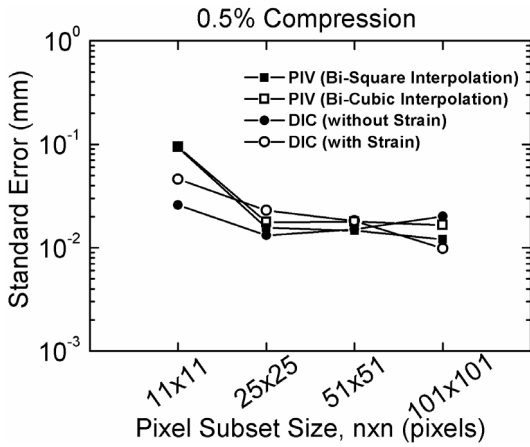
(e) 600x600 픽셀 이미지에서 변위 0.3mm일 때 측정된 변위의 표준 오차 분포

그림 10. 픽셀 집합의 크기, 해석 기법에 따른 표준 오차의 분포

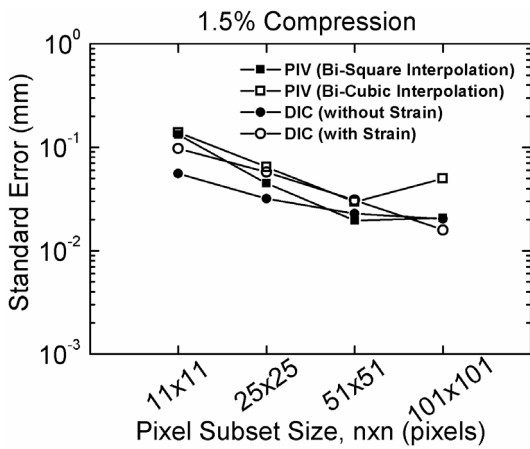
다. DIC 기법은 정확도가 PIV에 비하여 매우 낮게 나타났으며, 그림 10(e)와 같이 변형도를 고려한 DIC 기법은 가장 큰 픽셀 집합을 사용하여도 표준 오차가 0.005mm으로 나타났다. 이는 강제 운동 조건의 경우 실제로 변형이 발

생하지 않았음에도 불구하고 별도의 변수로 변형도를 고려하여 오히려 더 큰 오차가 발생한 것으로 판단된다.

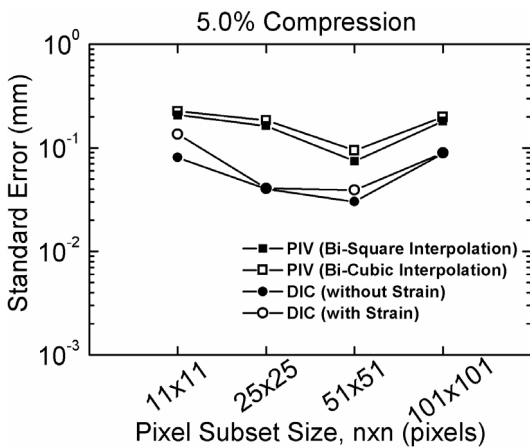
강체 운동을 하는 경우에는 변위 정도는 이미지 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않았다. 픽셀 집합이 클수록, 음



(a) 0.5% 압축 시 측정된 변위의 표준 오차 분포



(b) 1.5% 압축 시 측정된 변위의 표준 오차 분포



(c) 5.0% 압축 시 측정된 변위의 표준 오차 분포

그림 11. 300x300 pixel 이미지를 활용한 압축된 시료의 변형도, 픽셀 집합의 크기 및 해석 기법에 따른 표준 오차의 분포

표 4. 이미지 해상도 및 변형 정도에 따른 표준 오차

이미지 해상도 (pixels)	압축 변형			전단 변형		
	0.5%	1.5%	5.0%	0.5%	1.5%	5.0
150x150	0.0852	0.1477	0.2335	0.0978	0.1531	0.1212
300x300	0.0283	0.0521	0.1171	0.0258	0.0557	0.0941
600x600	0.0147	0.0408	0.1067	0.0116	0.0101	0.0585

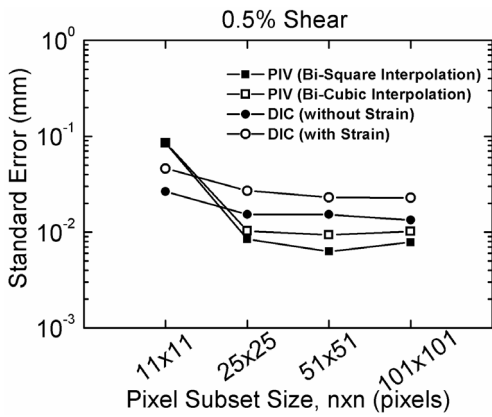
직이는 입자를 추적하는데 사용되어온 PIV가 DIC보다 더욱 정밀한 해석을 수행하였다. 특히 PIV기법에서 Bi-cubic 보간법을 사용할 때 가장 좋은 정밀도를 보여주었다.

4.2 변형이 발생한 시료의 이미지 해석 결과

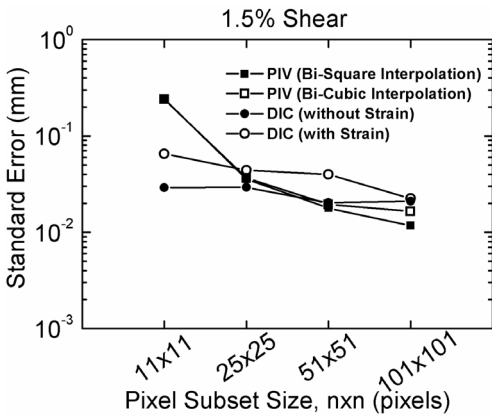
실제 입상체는 강제 운동과 함께 변형한다. 0.3mm의 이동과 함께 압축 및 전단 변형이 동시에 가해진 시료에 대하여 이미지 해석을 수행하였다. 표 4에 이미지 해상도 및 변형 정도에 따른 표준 오차를 정리하였다. 이미지 해상도의 증가와 함께 표준 오차가 감소하였으며, 이미지 해상도는 결과의 정확도에 영향을 미치는 기본적인 주요요소임을 다시 확인할 수 있다. 이와 함께 변형도가 증가함에 따라서 표준오차가 증가하고 정밀도가 낮아지는 현상을 확인할 수 있다. 또한, 강제 운동의 결과와 비교하여 오차 값이 매우 크게 나타난다. 변형이 많이 발생하면 픽셀 집합 내 입자들이 개별적으로 이동하므로 변형 전 픽셀 집합의 패턴과 동일한 패턴을 찾는 것이 상대적으로 어렵기 때문이다. 그러므로 큰 변형률 간격에서 변위 측정을 위한 이미지 해석을 적용하는 경우에는 작은 변형률 간격으로 나누어 이미지 해석을 수행하는 것이 타당할 것이다.

변형이 발생한 시료에서 픽셀 집합의 크기 및 해석 기법의 영향을 살펴 보기 위해서 표준 오차 값을 그림 11과 12에 도시하였다. 그림 11은 축방향 압축을 받는 경우, 그리고 그림 12는 횡방향 전단을 받는 경우에 대한 결과이다. 상대적으로 작은 변형에서는 픽셀 집합의 크기가 증가함에 따라 표준 오차 값이 대체로 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나, 상대적으로 큰 5.0%의 변형에서는 가장 큰 픽셀 집합에서 오차가 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 픽셀 집합이 커질수록 내부에서 불균질하게 이동하는 입자의 비율이 증가하기 때문으로 판단된다. 그러므로 변형이 발생하는 시료에 대해서는 정확도 향상을 위해 이미지 해석 조건에 따라 픽셀 크기가 제한되어야 한다.

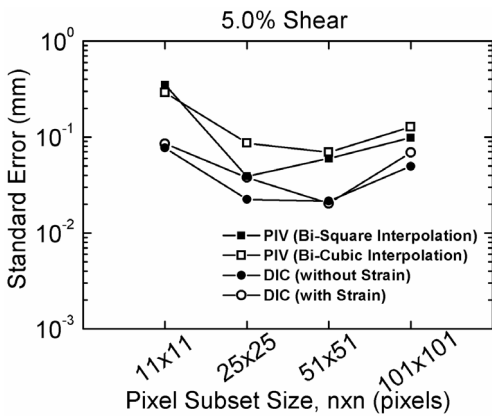
이미지 해석 기법에 따른 차이는 강제 운동의 경우처럼 뚜렷하게 관찰되지 않는다. 특히, 그림 11(a), (b)와 같이 압축 시료의 작은 변형에서는 그 차이가 뚜렷하지 않다.



(a) 0.5% 전단 시 측정된 변위의 표준 오차 분포



(b) 1.5% 전단 시 측정된 변위의 표준 오차 분포



(c) 5.0% 전단 시 측정된 변위의 표준 오차 분포

그림 12. 300x300 pixel 이미지를 활용한 전단된 시료의 변형도, 픽셀 집합의 크기 및 해석 기법에 따른 표준 오차의 분포

그림 12(a)와 (b)에 도시된 전단 시료의 작은 변형에 대해서는 Bi-square 기법을 적용한 PIV기법이 변위를 가장 정확하게 평가하였다. 그러나 그림 11(c)와 그림 12(c)의 5% 변형률에서는 압축과 전단 모두 DIC가 PIV보다 오차가 작게 나타났다. 변형도의 고려 여부에 따른 DIC 기법 간 차이는 크지 않았으며, 시료의 변형이 발생했음에도 불구하고 변형도를 고려하지 않은 DIC 기법이 변형도를 고려한 기법보다 오히려 더욱 정확한 결과를 제시하는 경우도 있다. 이는 뉴턴-랩슨 기법을 사용할 때에 변수가 많게 되면 local minimum으로 수렴할 가능성이 높아지기 때문이다.

300x300 픽셀의 이미지를 활용한 변형이 가해진 시료의 최적 이미지 해석 조건 및 그에 따른 오차를 정리하면 표 5와 같다. 0.01mm이상의 정밀도를 가지기 위해서는 0.5% 이하의 작은 변형이 발생한 두 이미지를 선택할 필요가 있다. 또한 변형이 발생했을 경우에는 픽셀 집합의 크기를 너무 크게 하는 것도 정밀도를 감소시키는 요인이 될 수 있다. 본 연구에서는 유효입경의 5~10배 길이를 한 변의 길이로 가지는 정사각형을 픽셀 집합으로 정하고, 변형의 정도가 커질수록 크기를 줄이는 것이 타당하다고 판단된다.

4.3 입자들의 변위 분포와 정밀도와의 관계

변형이 발생하면 강체 운동에 비하여 이미지 해석 결과의 정밀도가 매우 떨어진다. 이는 변위를 구하고자 하는 픽셀 집합 내부 입자들의 변위 분포와 관련된다. 이를 살펴보기 위하여 그림 13에 픽셀 집합 내 입자 변위의 표준 편차와 이미지 해석의 표준 오차와의 관계를 도시하였다. 강체 운동을 할 경우에는 픽셀 집합 내 변위는 거의 동일하여 표준 편차 값이 거의 0mm이다. 반면에 변형이 크게 발생한 경우에는 픽셀집합 내부에서의 입자 변위의 표준 편차 값이 0.3mm를 넘는 경우도 발생한다.

표준 편차 값이 작은 경우에는 이미지 해석의 오차 값도

표 5. 300x300 픽셀의 이미지 사용한 변형된 시료의 최적의 해석 조건 및 표준 오차

		픽셀집합 크기 (pixels)	픽셀집합 크기 (mm)	최적 해석 기법	표준오차
압축	0.5%	101x101	10.1x10.1	DIC(with Strain)	0.0098
	1.5%	51x51	5.1x5.1	PIV(Bi-Square)	0.0158
	5.0%	51x51	5.1x5.1	DIC(without Strain)	0.0302
전단	0.5%	51x51	5.1x5.1	PIV(Bi-Square)	0.0062
	1.5%	101x101	10.1x10.1	PIV(Bi-Square)	0.0117
	5.0%	51x51	5.1x5.1	DIC(with Strain)	0.0202

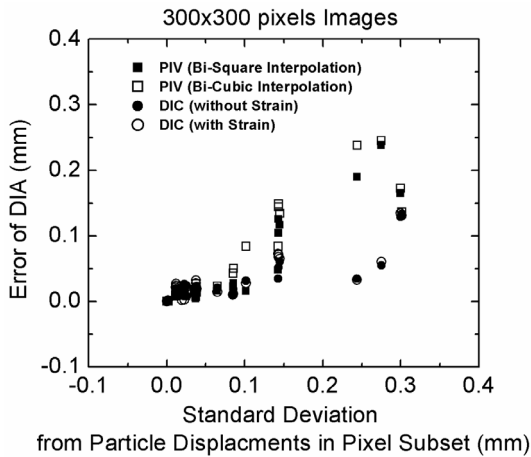


그림 13. 픽셀집합 내 입자 변위의 표준편차와 이미지 해석으로 구한 오차와의 관계

매우 작으나, 표준편차가 증가함에 따라 이미지 해석의 오차 역시 증가하는 경향이 뚜렷하게 관찰된다. 또한 표준편차가 큰 영역 내에서는 PIV로 구한 변위의 오차가 더 크며, 상대적으로 DIC의 오차가 작게 나타난다. 따라서 입자 변위의 표준 편차로 표현될 수 있는 내부 불균질성의 정도가 이미지 해석의 정밀도를 결정하며, 표준편차가 클 경우에는 PIV 기법보다 DIC 기법이 더 적절하다.

5. 결론

본 연구에서는 이미지 해상도, 변위 및 변형 정도, 해석 기법 등과 같이 이미지 해석 기법에 영향을 미치는 다양한 요소를 고려하여 사질토에 적합한 최적의 해석 조건 및 기법을 제시하고자 하였다. DEM으로 입상체 시료를 형성하고, 강체 운동, 압축 및 전단 변형이 발생한 시료의 이미지를 다양한 해상도로 캡처하였다. 이 이미지들을 활용하여 시료에서 4개의 픽셀 집합의 중심점을 잡고, 4가지 종류의 픽셀 집합 크기에 대해서 PIV기법과 DIC 기법을 각각 활용하여 해석을 수행하였다.

변형 없이 강체 운동을 하는 시료의 해석 결과는 다음과 같이 정리 될 수 있다.

- (1) 낮은 해상도에서는 입자의 형상이 뚜렷하지 않기 때문에 이미지 해석 결과가 적절히 수렴하지 못하며, 변위 산정에 큰 오차가 발생하는 것으로 관찰되었다. 적절한 변위를 산정하기 위해서는 입자의 유효 직경을 최소 10픽셀 이상의 해상도로 촬영하여 입자의 형상을 명확히 관찰할 필요가 있다.

- (2) 동일 해상도 이미지에는 변위에 따른 오차는 큰 차이를 보이지 않는다.
- (3) 픽셀 집합의 크기가 증가함에 따라 오차는 감소한다. 픽셀 집합의 크기가 커짐에 따라 명암 패턴이 명확해지고, 이에 따라 정확도가 증가하는 것으로 판단된다.
- (4) Bi-cubic 보간법을 사용한 PIV가 가장 정확하게 변위를 측정하였고, 표준오차가 약 0.0001mm 수준까지 감소함을 확인할 수 있다.

변형이 발생한 시료의 해석 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 이미지 해상도의 증가와 함께 표준 오차가 감소하였으며, 이미지 해상도는 해석 결과의 정확도에 영향을 미치는 기본적인 요소이다.
- (2) 변형률이 증가함에 따라서 정밀도가 낮아진다. 또한, 강체 운동의 결과와 비교하여 오차 값이 매우 크게 나타난다. 변형이 많이 발생하면 픽셀 집합 내 입자들이 개별적으로 모두 다르게 이동하여 변형 전 픽셀 집합의 패턴과 동일한 패턴을 가지는 변형 후 이미지에서 상관성 높은 위치를 찾는 것이 어려워지기 때문이다.
- (3) 상대적으로 작은 변형에서는 이미지 해석을 위한 픽셀 집합의 크기가 증가함에 따라 표준 오차 값이 대체로 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나, 상대적으로 큰 변형에서는 가장 큰 픽셀 집합에서 오차가 다시 증가하는 경향을 보였다. 변형이 발생하는 시료에 대해서는 픽셀 집합을 유효입경의 5~10배 사이의 정사각형 크기로 하는 것이 적절하며 변형이 진행될수록 그 크기를 줄이는 것이 바람직하다.
- (4) 이미지 해석 기법에 따른 차이는 강체 운동에서 나타난 것만큼 뚜렷하게 관찰되지 않았으나, 높은 변형률에서는 PIV보다 DIC가 정밀한 결과를 제시한다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. 장의룡, 추윤식, 이원택, 정충기, (2008), “디지털 이미지 코릴레

- 이선 기법으로 평가한 평면변형률 시험의 단부 구속 효과”, *한국지반공학학회논문집*, 제24권, 제7호, pp.25-36.
2. Adrian, R. J. (1991), “Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics”, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 23, pp.261-304.
 3. Alshibli, K. A., Sture, S. (1999), “Sand Shear Band Thickness Measurements by Digital Imaging Techniques”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.13, No.2, pp.103-109.
 4. Alshibli, K. A., Sture, S., Costes, N. C., Frank, M. L., Lankton, F. R., Batiste, S. N., and Swanson, R. A. (2000), “Assessment of Localized Deformations in Sand Using X-Ray Computed Tomography”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.23, No.3, pp.274-299.
 5. Bruck, H. A., McNeill, S. R., Sutton, M. A., and Peter, W. H. (1989), “Digital Image Correlation Using Newton-Raphson Method of Partial Differential Correction”, *Experimental Mechanics*, Vol.29, No.3, pp.261-268.
 6. Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. (1979), “A discrete numerical model for granular assemblies”, *Geotechnique* 29, No.1, pp.47-65.
 7. Desrues, J.R., Chambon, M., Mokni, and Mazerolle, F. (1996), “Void Ratio Evolution Inside Shear Bands in Triaxial Sand Specimens Studied by Computed Tomography”, *Geotechnique*, Vol.46, No.3, pp.529-546.
 8. Hung P. C., Voloshin, A. S., (2003), “In-plane Strain Measurement by Digital Image Correlation”, *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, Vol.25, No.3, pp.215-221
 9. Leung, C. F., Xie, Y., Chow, Y. K. (2008), “Use of PIV to Investigate Spudcan-Pile Interaction”, *Proc. of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference Vancouver*, BC, Canada, pp.721-726.
 10. Liang, L., Saada, A., Figueroa, J. L., and Cope, C.T. (1997), “The Use of Digital Image Processing in Monitoring Shear Band Development”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.20, No.3, pp.324-339.
 11. Sutton, M. A., McNeil, S. R., Jang, J., and Babai, M. (1988), “The Effect of Subpixel Images Restoration on Digital Image Correlation Estimates”, *Opt. Eng.*, Vol.27, No.10, pp.870-877.
 12. Rechenmacher, A. L., and Finno, J. F. (2004), “Digital Image Correlation to Evaluate Shear Banding in Dilative Sands”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.27, No.1, pp.1-10.
 13. Vendroux, G., Knauss, W. G. (1998), “Submicron Deformation Field Measurements: Part2. Improved Digital Image Correlation”, *Experimental Mechanics*, Vol.38, No.2, pp.86-92.
 14. Wong, R. C. K. (2000), “Shear Deformation of locked Sand in Triaxial Compression”, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.23, No.2, pp.158-170.
 15. White, D. J., Take, W. A., and Bolton, M. D. (2003), “Soil Deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry”, *Geotechnique* 53, No.7, pp.619-631.
 16. Zhang, Y. D., Tan, T. S., and Leung, C. F. (2005), “Application of particle image velocimetry (PIV) in centrifuge testing of uniform clay”, *Proc. Int. J. Physical Modeling in Geotechnics*, Vol.5, No.1, pp.15-26.

(접수일자 2009. 10. 22, 심사완료일 2009. 11. 25)