

흙의 변형 측정을 위한 디지털 이미지 해석 기법의 최적화 및 정확도 평가

Evaluation of Accuracy and Optimization of Digital Image Analysis Technique for Measuring Deformation of Soils

김 준 영¹ Kim, Jun-Young
장 의 룡² Jang, Eui-Ryong
정 충 기³ Chung, Choong-Ki

Abstract

Digital image analysis techniques have been developed and utilized in the field of solid mechanics and fluid mechanics to measure the deformation and velocity of a target object. The deformation measurement systems based on Particle Image Velocimetry (PIV) and Digital Image Correlation (DIC) have been attempted in geotechnical testings (e.g., physical model tests) for observing the deformation of soils. The digital image analysis is influenced by image pattern of test materials, resolution of the used digital camera, target area, image analysis techniques, and analysis conditions. Therefore, optimal analysis conditions should be determined to obtain high quality results on soil deformations. In the present study, various influence factors on the digital image analysis were described and summarized. The optimizing procedure for high accurate results was then proposed. Finally, the applicability of the developed procedure was examined.

요 지

고체 역학 및 유체 역학 분야에서 대상 물체의 변형, 변위 및 속도를 측정하기 위하여 디지털 이미지 해석 기법이 개발, 사용되고 있다. 지반 공학에서도 흙을 포함한 지반 구조물의 변형을 관측하기 위하여 Particle Image Velocimetry (PIV)와 Digital Image Correlation (DIC) 기법이 실내 시험 및 모형 시험 등에 적용되기 시작하는 추세이다. 이미지 해석은 시료의 종류 및 크기, 카메라 해상도, 해석 범위, 이미지 해석 조건에 영향을 받으므로, 다양한 조건에서의 정밀도를 평가하여 합리적으로 최적 조건을 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 디지털 이미지 해석 결과에 영향을 미치는 다양한 요소를 정리하였다. 그리고 높은 정확도의 해석 결과를 얻을 수 있는 최적의 이미지 해석 조건을 결정하는 절차를 제안하였으며 최종적으로 제안된 절차의 적용성을 점성토 시료에 대하여 검증하였다.

Keywords : Accuracy evaluation, Digital image analysis, Optimization, Soil deformation

1. 서 론

디지털 이미지 해석은 컴퓨터를 통해 디지털화된 이

미지로부터 유용한 정보를 구해내는 과정을 의미한다.
의학 분야에서 암 등의 질병을 검사하는데 사용되는
Magnetic Resonance Imaging (MRI) 장비나 실생활에서

1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D Course Student, Dept. of Civil & Environ. Eng., Seoul National Univ., doom666@snu.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 서울대학교 공학연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Eng. Research Institute, Seoul National Univ.)

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

사용되는 자동차 번호 인식기 등이 이미지 해석을 응용한 예라고 할 수 있다. 공학 분야에서도 암석 시료의 광물 성분 분석, 유체 흐름을 따라 이동하는 물체의 움직임 측정, 그리고 재료의 변형 관찰 및 균열의 검사 등에 다양하게 활용되어 왔다. 최근에는 컴퓨터의 발달과 디지털 카메라의 고급화 등으로 자동화된 디지털 이미지 프로세싱 기술이 흙에 대한 평면변형률 시험(Alshibli 등, 1999; Rechenmacher and Finno, 2004; 장의룡 등, 2008), 지반-구조물의 상호작용(soil-structure interaction) (Samer 등, 2002), 원심 모형 시험(centrifuge model test) (Zhang 등, 2009; Leung 등, 2008) 등과 같은 지반 공학 분야에도 적용되고 있다.

흙의 거동 특성을 파악하기 위한 실내시험에서는 그 목적에 따라 다양한 계측 장비가 활용된다. 특히, 시료의 변형 측정은 모든 시험에서 기본적으로 이루어지며 두 지점 사이의 상대적 변위 차이를 측정하는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)가 주로 사용된다. 국부적으로 발생하는 미소 변형(0.001%) 영역의 측정에는 국부 LVDT, 근접계(proximity transducer), 경사계(inclinometer), 홀 이펙트 게이지(hall effect gauge) 등이 사용되는데, 이와 같은 변위 측정 장비는 임의로 정한 두 점 사이의 상대 변위만 측정하여, 이 측정값을 근거로 시료 전체의 평균적 변위 거동만을 구할 수 있다. 즉, 시료 내 다양한 위치에서의 변위를 구하는 것은 불가능하다. 반면, 자동화된 디지털 이미지 해석을 활용할 경우 대상 영역 모든 위치에서의 변위를 연속적으로 구할 수 있고, 이미지 촬영 조건이나 이미지 해석 조건에 따라 미소 변형 측정도 가능하다. 그리고 시험 시 시료에 LVDT와 같은 센서를 설치할 필요가 없어 편리하고 시료의 교란도 방지할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 충분히 좁은 간격으로 이미지를 촬영하면, 해석하고자 하는 변형 구간을 원하는 대로 선택하여 세밀하게 평가할 수 있다.

그러나 이미지 해석은 디지털 카메라를 이용해 얻은 이미지의 해상도와 촬영 범위(면적), 시료의 종류와 시료가 가지고 있는 이미지 패턴, 그리고 이미지 해석 기법 및 해석 조건과 같은 다양한 요소의 영향을 받는다. 따라서 디지털 이미지 해석 기법을 활용하여 흙의 변위를 측정하기 위해서는 먼저 정확도에 영향을 미칠 수 있는 조건을 다양하게 변화시켜 최적의 이미지 해석 조건을 결정하고 그에 해당하는 정확도를 평가하는 절차가 선행될 필요가 있다.

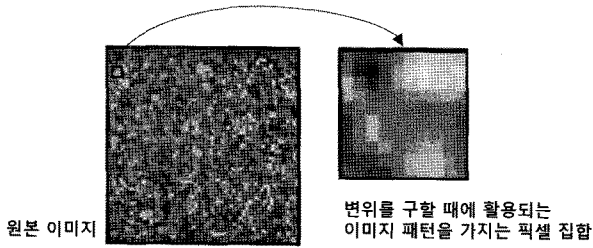
본 연구에서는 디지털 이미지 해석 결과에 영향을 미치는 다양한 요소를 정리하였다. 그리고 영향 요소들을 다양하게 변화시켜 최적의 이미지 해석 조건을 결정하고, 정확도를 평가하는 절차를 제안하였다. 이미지 해석의 정밀도를 평가하기 위해서는 이미지 해석 결과와 비교 평가할 실제 변위를 알고 있어야 한다. 실제 시험을 통해서는 시료의 위치에 따른 실제 변위를 측정할 수 없기 때문에, 이미지 자체에 변형을 가하는 방법을 선택하여 변형된 시료의 이미지를 얻고, 실제 변위를 계산하였다. 마지막으로 제안된 최적화 및 정밀도 평가 절차를 점성토 시료 이미지에 적용하여 정밀도를 평가하고, 그 적용성을 검증하였다.

2. 이미지 해석의 영향 요소

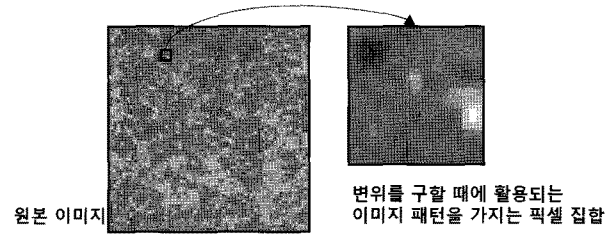
2.1 이미지 해석의 필수 요소

본 연구에서는 여러 이미지를 중첩시켜 3차원적으로 대상을 형상화하는 3-D 이미지 해석이 아닌, 평면상의 변형 측정에 국한된 2-D 이미지 해석을 다루었다. 2-D 이미지 해석 기법을 통하여 시험 중 촬영된 디지털 이미지로 이미지 해석을 수행하여 관찰하고자 하는 대상 물체의 변위 및 변형을 측정하기 위해서는 몇 가지 조건이 필수적이다. 먼저, 관찰되는 대상은 굴곡이 없는 평면이어야 하며, 평면상에서만 이동·변형해야 한다. 둘째, 대상을 촬영하는 카메라의 방향은 대상 평면과 수직을 이루도록 카메라와 대상 물체 사이의 각도를 조절하여야 한다. 셋째, 불균질한 조명은 촬영된 이미지의 명암 값에 변동을 줄 수 있기 때문에 밝은 조명이 항상 균일하게 주어져야 한다. 마지막으로, 이미지 프로세싱을 수행하기 위해서는 관찰되는 대상 표면에 특징, 즉 이미지 패턴이 있어야 한다. 특정 이미지에서 변형 후 위치를 찾을 때에 이미지 패턴의 존재가 필수적이기 때문이며, 이를 위하여 그림 1(1)과 같이 일정한 크기를 가지는 픽셀 집합을 활용한다.

서로 다른 색깔 혹은 명도를 가진 입자들로 구성된 흙의 경우 조명이 주어졌을 때 자연스럽게 이미지 해석에 필요한 명암 패턴을 가지게 된다. 하지만 비교적 균질한 명도의 사질토와 대부분의 점성토는 기본적으로 구분이 가능한 패턴을 갖기 어렵기 때문에 관찰되는 표면에 염료나 염색된 입자를 인위적으로 뿌리거나 첨가하는 작업이 필요하다. 그림 1(a)는 White 등(2003)이 자



(a) 자연적으로 이미지 패턴이 형성된 사질토(White 등, 2003)



(b) 인위적으로 검은 모래를 첨가하여 형성한 주문진 표준사(장의룡 등, 2008)

그림 1. 사질토 시료의 이미지 패턴 예시와 픽셀 집합

연적으로 성형한 사질토 시료로써 전자의 예이며, 그림 1(b)는 장의룡 등(2008)이 평면변형률 시험에서 시료의 변위를 측정하기 위하여 주문진 표준사에 검은 모래를 섞어 이미지 패턴을 형성하고 멤브레인을 통하여 촬영한 이미지의 예이다.

2.2 이미지 해석에 영향을 미치는 하드웨어적 요소

이미지 해석의 정확도는 촬영 장비와 촬영 범위의 영향을 받는다. 촬영 장비가 좋을수록, 즉 촬영에 사용되는 디지털 카메라의 해상도가 높을수록 더 높은 해상도의 이미지를 얻을 수 있어 이미지 해석 결과의 정확도를 높일 수 있다. 반면, 정해진 디지털 카메라의 해상도 조건 하에서 촬영 범위가 넓어지면 얻을 수 있는 이미지의 해상도는 낮아져 결과적으로 이미지 해석 결과의 정확도는 낮아지게 된다. 예를 들어, 20mm × 20mm의 시료를 100 × 100pixel의 해상도를 가진 카메라로 촬영하면 이미지의 해상도는 0.2mm/pixel이 되고, 200 × 200pixel의 해상도를 가진 카메라로 촬영하면 0.1mm/pixel의 해상도를 가진 이미지를 얻을 수 있다. 또한, 동일한 시료를 카메라 4대로 부분 촬영하여 촬영 범위를 작게 하면 해상도를 높이는 효과를 얻을 수 있다. 즉, 그림 2와 같

이 이미지를 4개로 분할하면 2배 높은 해상도를 갖는 이미지를 얻을 수 있다.

따라서, 더 높은 해상도의 디지털 카메라가 개발될수록 그리고 시료의 일부분을 정밀촬영하거나 여러 대의 카메라를 이용하여 전체 시료를 나누어 분할 촬영할 경우 더 높은 해상도의 이미지를 얻을 수 있고, 이에 따라 더 정확한 이미지 해석을 수행할 수 있다.

2.3 이미지 해석에 영향을 미치는 해석 조건

이미지 해석은 서로 다른 시간에 촬영된 두 개의 디지털 이미지를 이용하여 이미지를 구성하는 픽셀 집합(pixel subset)들의 상관성이 가장 높은 점을 찾고, 이로써 상대적인 변위를 측정한다. 변형 전 이미지의 임의 위치에서 변위를 구할 때에 하나의 픽셀을 사용하지 않고 임의의 명암 패턴을 가지는 픽셀 집합(그림 1)을 활용하여 변형 후의 이미지에서 가장 유사한 위치를 찾는다. 이렇게 구해진 상대적인 위치 차이가 변위가 되는 것이다. 이때 사용된 해석 기법, 해석되는 변형률 간격 및 변형 종류, 그리고 픽셀 집합의 크기 등의 해석 조건에 따라 그 결과가 달라진다. 각 해석 조건을 정리하면 아래와 같다.

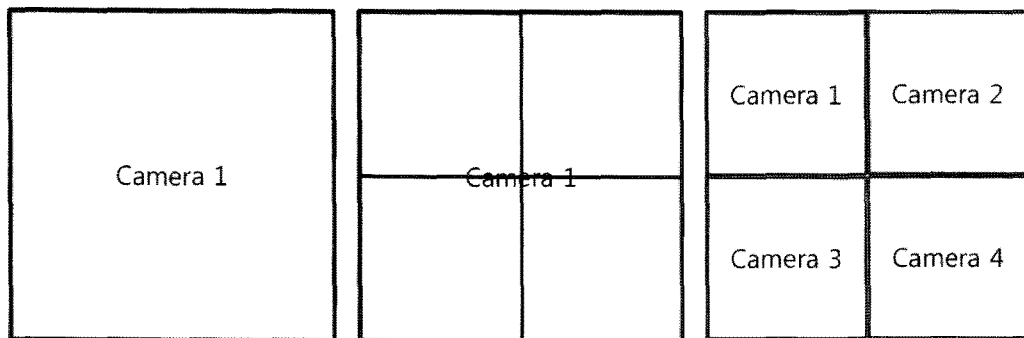
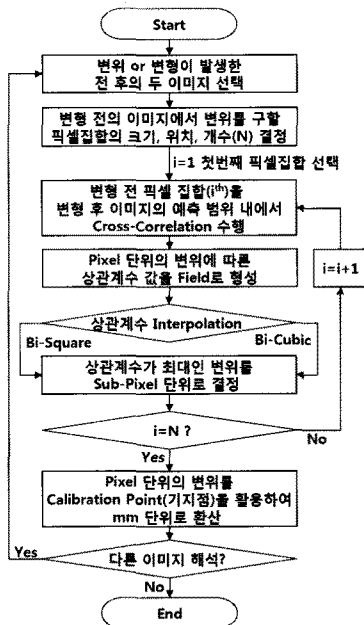
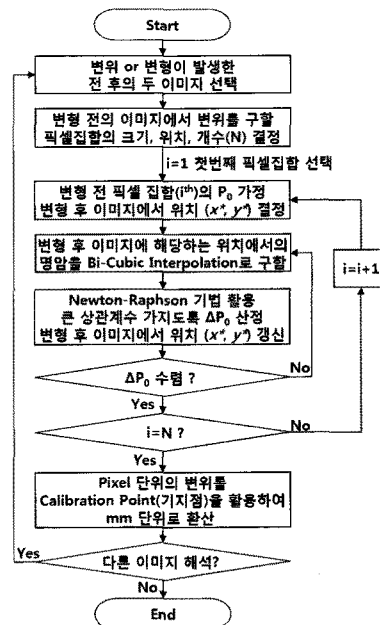


그림 2. 촬영 장비와 촬영 범위가 이미지의 해상도에 미치는 영향



(a) PIV 기법



(b) DIC 기법

그림 3. 이미지 해석 절차의 흐름도(장의룡 등, 2009)

2.3.1 이미지 해석 기법

토질 역학 분야에서는 Particle Image Velocimetry(PIV)와 Digital Image Correlation(DIC) 기법이 적용되어 왔다. 장의룡 등(2009)은 두 기법에 대한 내용을 정리하고 결과를 비교 평가하였다. 두 해석기법의 큰 차이는 가장 상관성 높은 픽셀집합의 위치를 sub-pixel 단위의 해상도로 구할 때에 나타난다. PIV 기법은 cross-correlation으로 구해진 상관계수를 보간(interpolation)하는 반면, DIC 기법은 이미지 자체를 보간 하여 반복 계산하는 알고리즘을 사용한다. PIV 기법에서 상관계수를 보간할 때는 bi-square 또는 bi-cubic 보간법이, DIC 기법에서 이미지의 명암 값을 보간할 때에는 bi-cubic 보간법이 널리 사용된다. DIC 기법에서는 초기 픽셀 집합의 변위 및 변형률을 가정하여 초기 픽셀 집합의 변형 후 위치를 결정하며, 변형률의 사용 여부에 따라 픽셀 집합의 모양이 변하는 것을 고려하거나 고려하지 않을 수 있다. 각 해석 기법의 절차를 그림 3에 정리하였다.

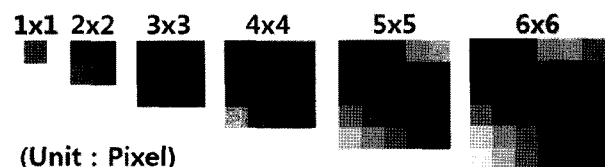
2.3.2 해석되는 변형률 간격

PIV 기법은 유체역학 분야에서 유체 흐름을 따라 이동하는 물체의 움직임을 찾는 데 활용되었다. 즉, 강제 운동을 하는 물체의 변위를 산정하는 데에는 적합하지만, 변형하는 물체의 변위를 구할 때에는 정확도가 떨어질 수 있다. 반면 DIC 기법은 Newton-Raphson 방법

을 이용, 반복 계산하여 수렴하는 변위를 구하게 되므로, 발산하거나 떨림이 크기 때문에 변형 정도에 따른 정확도가 떨어질 수 있다. 즉 원하는 정확도 수준에 따라서 해석되는 이미지 변형률 간격을 제안할 필요가 있다.

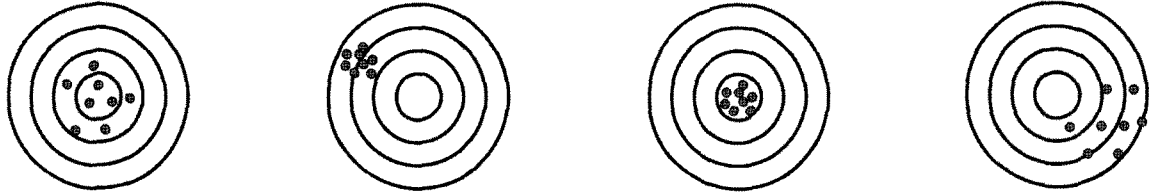
2.3.3 픽셀 집합의 크기

앞서 언급하였듯이 이미지 해석 기법에서는 픽셀 집합이 사용되며, 이는 변위를 구할 때에 상관성 비교하는 이미지 패턴의 유일성을 확보하기 위함이다. 그림 4와 같이 픽셀 집합의 크기가 커짐에 따라서 이미지 패턴은 더욱 명확해지며, 변형 후 이미지에서 하나의 가장 유사한 패턴을 가질 확률이 높아지게 된다. 그러나 픽셀 집합이 너무 커지게 되면 시료의 위치에 따른 변위 차이를 표현할 수 없기 때문에 적절한 크기의 픽셀 집합을 사용하는 것이 중요하다.



(Unit : Pixel)

그림 4. 픽셀 집합 크기에 따른 이미지 패턴(장의룡 등, 2009)



(a) Accurate and not precise (b) Not accurate and precise (c) Accurate and precise (d) Not accurate and not precise

그림 5. 정확도와 정밀도의 의미

3. 이미지 해석의 최적화 및 정확도 평가 절차

변형 측정을 위한 디지털 이미지 해석은 평면상의 다양한 위치에서 발생한 변위를 정확하게 측정하기 위하여 활용되고 있다. 그러나 위에 정리된 이미지 해석의 영향 요소에 따라 이미지 해석 결과는 크게 달라질 수 있다. 그러므로 실제 변위를 가장 정확하게 측정하여 오차를 최소화 할 수 있는 이미지 해석의 최적 조건을 결정할 필요가 있다.

일반적으로 통계에서 측정 오차의 크기를 나타내는 척도는 정확도(Accuracy), 정밀도(Precision), 해상도(Resolution)로 구분된다(Taylor, 1999). 정확도는 많은 측정으로부터 산정되는 평균적인 오차의 크기를, 정밀도는 여러 번의 측정에서 나타나는 분산 정도에 의한 오차를, 해상도는 측정되는 최소 단위를 의미한다. 컴퓨터를 통한 이미지 해석에서는 원하는 소수점까지의 결과를 얻을 수 있으므로 해상도는 크게 중요하지 않으며, 정확도와 정밀도가 오차 크기를 결정한다. 정확도와 정밀도는 그림 5의 과녁의 개념을 이용하여 쉽게 설명할 수 있다. 여러 번의 시도(측정)를 통하여 그림 5와 같은 4 가지의 측정 결과를 얻었다고 가정하자. 과녁 가운데가 가장 정확하고 오차가 작게 측정된 결과라고 한다면, 그림 5(a)는 대체로 과녁 가운데를 중심으로 분포하기 때문에 정확하다고 할 수는 있지만 그 분포가 넓기 때문에 정밀하다고는 할 수 없다(Accurate and not precise). 그림 5(b)는 분포가 집중되어 있기 때문에 정밀하다고는 할 수 있지만, 과녁의 중앙에서 멀리 떨어져 있기 때문에 정확도는 낮다고 할 수 있다(Not accurate and precise).

본 연구에서도 정확도와 정밀도를 척도로 하여 이미지 해석의 오차를 평가하고자 한다. 다양한 위치에서 이미 알고 있는 실제 변위와 이미지 해석으로 구해진 변위의 오차를 통계적으로 분석하여 정확도와 정밀도를 평가한다. 예를 들어 100개의 지점에서 변위를 이미지 해석으로 산정한 후 실제 변위와의 오차를 그림 6과 같이

확률 밀도 함수로 나타낼 수 있다. 이때 오차의 평균은 정확도(Accuracy)를 의미하며, 분산은 정밀도(Precision)를 나타낸다. 본 연구에서는 정확도에 정밀도를 포함하고자, 90%의 신뢰 구간에서 발생할 수 있는 최대 오차를 평가하였다. 본 연구에서는 이렇게 평가된 최대 오차의 개념을 활용하여 정밀도의 개념이 포함된 정확도를 평가하였다. 90% 신뢰구간에서 발생할 수 있는 최대 오차가 작을수록 해석의 정확도가 높은 것을 의미한다.

이미지 해석의 결과는 mm와 같이 일반적인 길이 단위가 아닌 픽셀(pixel) 단위로 나타난다. 이를 일반적인 길이 단위로 환산하기 위해서는 기지의 참조 점들의 좌표를 mm 단위로 입력하여 단위 보정하는 단계가 필요하다. 즉, 본 연구에서 구해지는 이미지 해석으로 구해지는 변위의 정확도도 픽셀(pixel) 단위로 나타나며, 이는 이미지의 해상도(mm 단위의 촬영 대상에 대한 픽셀 단위의 이미지 크기, mm/pixel)를 고려하여 mm 단위로 환산될 수 있다. 이로부터, 전체 시료의 길이를 고려한 변형률 단위(%)의 정확도도 산정이 가능하다. 본 연구에서 이미지 해석의 최적 조건을 찾기 위한 절차를 아래와 같이 제시하였다.

① 이미지 해석을 위한 디지털 이미지 확보 : 이미지 해

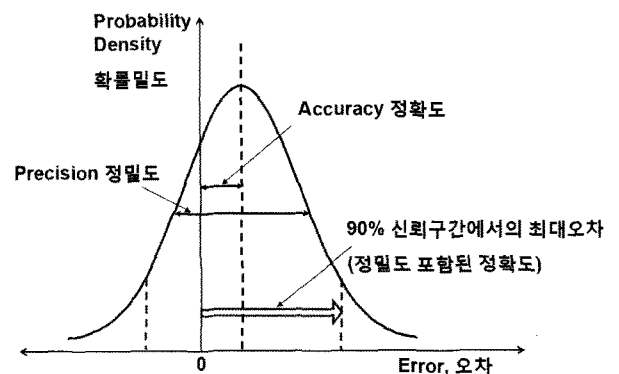


그림 6. 본 연구에서 활용된 정밀도가 포함된 정확도의 개념으로써 90% 신뢰구간에서의 최대 오차

석의 정확도를 평가하고자 하는 해당 시험의 시료를 성형하고, 카메라와 조명 등의 이미지 촬영 시스템을 구비한다. 그리고 초기 시료에서 관찰하고자 하는 영역을 최대의 해상도로 촬영하고, 이미지 해상도(mm/pixel)를 구한다. 이때 이미지의 해상도를 높이기 위해 이미지가 촬영되는 영역을 관찰이 필요한 부분만으로 국한하여 최소화하는 것이 좋다. 또한 카메라의 수를 늘려서 관찰하고자 하는 영역을 여러 부분으로 나누어 분할 촬영하는 것도 가능하다.

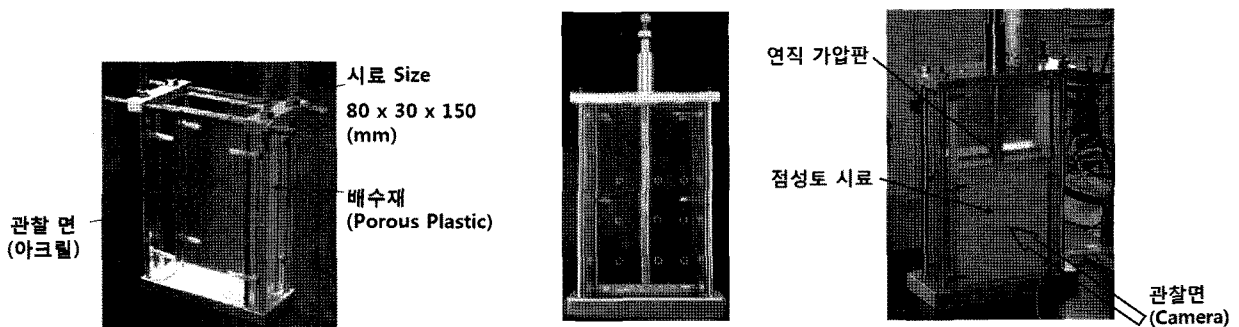
- ② 변형 이미지 확보 : 실제 이미지 해석은 실제 변형된 시료의 이미지를 촬영하고, 변형 전의 이미지와 비교하여 이루어진다. 그러나 실제 실험에서는 경계 조건을 조절하여 시료를 최대한 균질하게 변형시켜도 시료 내부는 여러 요인에 의하여 위치에 따라 다양하게 변형할 수 있다. 본 연구에서는 이미지 기법의 최적화를 목적으로 하고 있기 때문에 실제 시료의 변형 거동을 배제하고 해석을 수행하였다. 단, 후 시료에서 나타나는 이미지 패턴을 필요로 하기 때문에 변형 전 이미지는 ① 단계에서 구해진 초기 원본 시료의 이미지를 활용하고, 변형 후 이미지는 포토샵 등의 이미지 편집 프로그램을 사용하여 압축, 인장 등의 변형을 발생시켜 획득하였다. 이미지 편집을 통하여 가해진 균질한 변형으로부터 변형된 이미지를 얻으면 시료 내부의 정확한 변위는 위치 좌표와 변형률의 크기를 고려하여 계산이 가능하다.
- ③ 이미지 해석의 수행 : 다양한 조건의 이미지 해석 조건을 적용하여 다양한 위치(100개 이상)에서 변위를 산정한다. 다양한 조건이란 앞서 정리된 해석 기법(PIV와 DIC), 픽셀 집합의 크기, 변형정도를 변화시켜서 구현한다. 특히, PIV 기법에서는 bi-cubic 보간과 bi-square 보간 두가지 방법(PIV bi-square, PIV

bi-cubic)을 각각 사용하며, DIC 기법에서는 반복하는 변수에 변형률을 고려하는지 여부에 따라 두 가지 방법(DIC with strains, DIC without strains)을 활용한다.

- ④ 오차 평가 및 최적 조건 결정 : 이미지 해석 결과의 오차를 평가하기 위해서는 이미지 해석을 수행한 다양한 위치에서의 실제 변위 값이 필요하다. 앞서 디지털 이미지의 편집을 통하여 변형 이미지를 확보하였기 때문에 간단하게 위치좌표를 이용하여 정확한 변위를 산정할 수 있다. 예를 들어, $100 \times 100\text{pixel}$ 의 디지털 이미지에 1%의 연직 방향 압축을 가하게 되면, (50, 50)의 픽셀 좌표는 (50, 49.5)의 픽셀 좌표로 이동하며 변위는 연직 방향으로 0.5만큼 내려가게 되는 것이다. 다양한 위치에서 이미지 해석 결과로 얻은 변위와 실제 변위를 비교하여 구해진 오차를 통계 분석하여 정밀도의 개념이 포함된 픽셀(pixel) 단위의 정확도를 평가한다. 이 과정을 ③ 단계에서 수행된 다양한 조건에서 모두 수행하여 90% 신뢰 구간에서 발생 가능한 최대오차가 가장 작은, 즉 정확도가 가장 높은 최적의 조건을 결정한다.
- ⑤ 실제 길이 단위와 변형률 단위의 정확도를 산정 및 최적 조건 제안 : 실제 픽셀 단위의 정확도 결과를 ① 단계에서 평가된 이미지의 해상도를 고려하여 mm단위로 환산한다. 변위의 정확도로부터 시료 전체 크기에 대한 변형률 정확도(%)도 평가한다. 그리고 합리적인 기준으로 최적의 조건을 제안한다.

4. 점성토 이미지 해석에 제안된 절차의 적용

- ① 이미지 해석을 위한 디지털 이미지 확보
본 연구에서는 앞서 제안한 최적화 및 정확도 평가



(a) 김준영 등(2008)이 사용한 압밀 시험 셀 (b) 점성토 이미지 확보를 위한 본 연구에서 사용된 압밀 시험 셀 및 시험 형상

그림 7. 점성토 시료의 변형 거동 평가를 위한 시험 셀

를 위한 절차를 점성토 시료 이미지에 적용하였다. 김준영 등(2008)은 방사(횡)방향 배수 조건에서 점성토의 변형 거동을 평가하고자 그림 7(a)과 같이 투명한 직육면체 압밀 시험 셀을 제작한 사례가 있다. 본 연구에서도 김준영 등(2008)이 사용한 시험 셀과 유사한 형상의 압밀 시험 셀인 그림 7(b)를 활용하였다. 재성형된 카올리나이트 시료를 촬영한 초기 원 이미지를 해석에 활용하였다.

카올리나이트는 기본적으로 자연적인 명암 패턴을 갖고 있지 않기 때문에 임의적인 패턴을 만들기 위하여 스프레이로 잉크를 시료에 뿌려서 흡착시켰다. 투명한 평면 아크릴판을 통하여 관찰된 시료를 카메라 Nikon D90으로 촬영하여 4288 × 2848pixel의 디지털 이미지를 확보하였다. 직각자를 사용하여 촬영 방향과 촬영면이 수직을 이루도록 하였으며, 근접 촬영에 특화된 AF MICRO NIKKOR 60mm 렌즈로 50cm 거리에서 1:1 배율 촬영하여 사진 촬영 중에 발생하는 왜곡을 최소화하였다.

전체 시료의 최대 높이 방향 150mm를 2848pixel 크기로 촬영하여 0.0527mm/pixel의 해상도를 얻었다. 점성토 시료 전체 이미지와 이미지 패턴을 보기 위한 확대

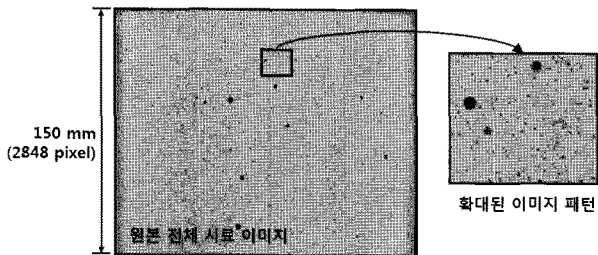


그림 8. 이미지 해석에 활용된 점성토 이미지

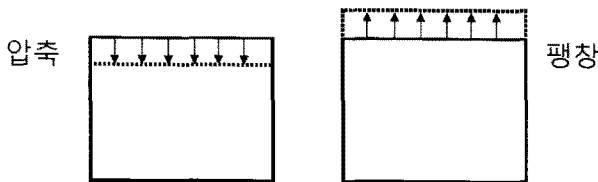


그림 9. 점성토 시료 이미지의 압축 인장 변형

이미지를 그림 8에 나타내었다. 이후 단계에서 구해지는 이미지 해석의 최적 조건 및 정확도는 그림 8의 이미지 패턴과 해상도를 가진 점성토 시료에만 적용될 수 있다.

② 변형 이미지 확보

이미지 편집 프로그램을 이용하여 ①에서 얻어진 원본 시료의 이미지 자체를 변형시켰다. 그림 9와 같이 횡방향 변형은 발생시키지 않고 연직방향으로 압축, 인장만을 발생시킨 이미지를 이용하였다. 즉, 이미지 편집 프로그램을 활용하여 이미지의 높이를 2848pixel에서 2pixel 압축시켜 2846pixel로 만들면 0.07(=2/2848)%의 압축 변형을 발생시킬 수 있다. 이때 각 pixel 좌표는 횡방향 변위 없이 전체 시료 이미지 높이(150mm)에 0.07(=2/2848)%을 곱한 만큼의 연직 변위가 발생하게 된다. 이와 같은 방법으로 정확한 변위를 구할 수 있으며 다음단계에서 구해지는 이미지 해석을 통한 변위와 비교하여 이미지 해석의 오차를 분석할 수 있다. 압축과 인장에 대하여 0.07, 0.14, 0.28, 0.56, 1.1, 2.2%의 변형률을 갖도록 편집해 총 12개의 변형 이미지를 얻었으며, 모두 ①에서 얻어진 원본 시료 이미지를 기준으로 하였다.

③ 이미지 해석의 수행

다양한 조건에서 이미지 해석을 수행하였고, 조건을 표 1에 정리하였다. 6개의 변형률 간격, 4 가지의 해석 기법, 4종류의 픽셀 집합 크기를 적용하여, 압축과 인장 각각 96회, 총 192회의 이미지 해석을 실시하였다. 각 이미지 해석에서 사용되는 변형 전 이미지는 모두 ①에서 얻어진 원본 시료 이미지를, 변형 후 이미지는 ②에서 얻어진 변형 이미지를 사용하였다. 통계 분석을 위하여 그림 10에 도시된 100개의 픽셀 집합 중심점에서의 변위를 산정하였다.

표 1. 수행된 이미지 해석 조건

변형률 간격	이미지 해석기법	픽셀집합 크기	시험 횟수
0.07%	PIV(bi-square) PIV(bi-cubic) DIC(without strains) DIC(with strains)	15x15 30x30 60x60 120x120	압축, 인장 각각 96회 총 192회
0.14%			
0.28%			
0.56%			
1.1%			
2.2%			

④ 오차 평가 및 최적 조건 결정

②에서 예시로 설명된 바와 같이 시료 이미지를 균일

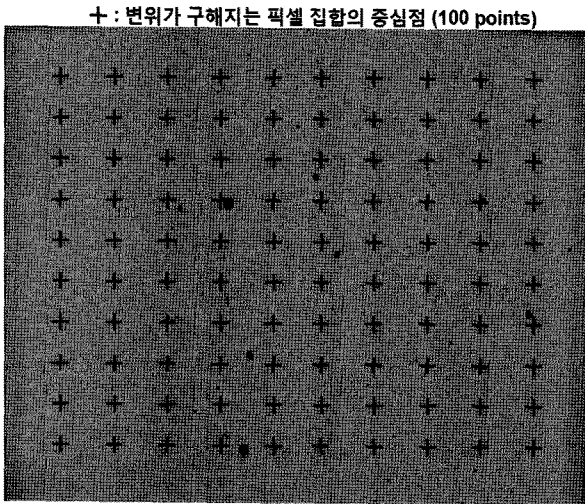


그림 10. 변위가 구해지는 100개의 픽셀 집합의 중심점들

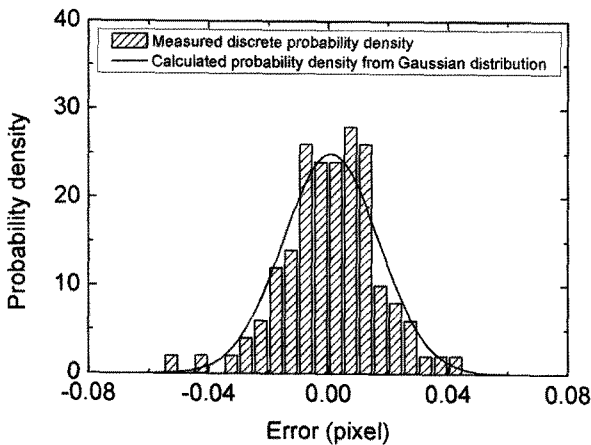
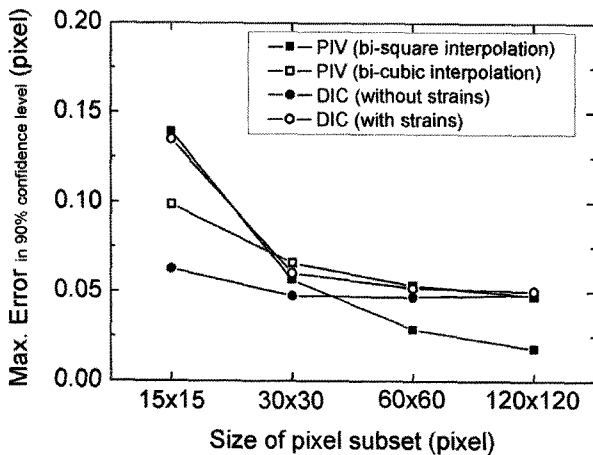


그림 11. 이미지 해석한 결과로 도출된 오차의 분포(0.14% 압축된 이미지, bi-square 내삽이 적용된 PIV 기법, 60x60 pixels 크기의 픽셀 집합)

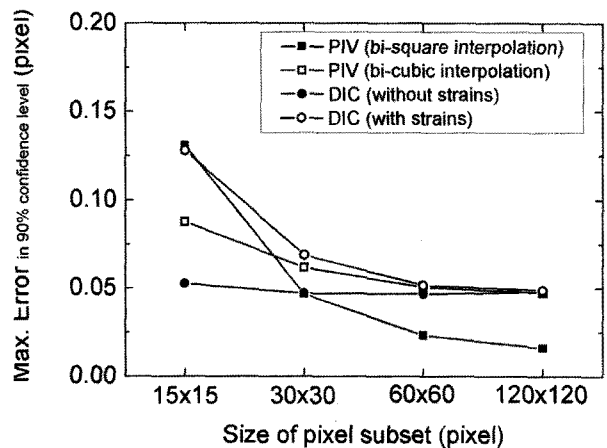
하게 압축 및 인장 변형시켰기 때문에 이미지 해석을 수행한 다양한 위치에서 실제 변위는 위치좌표에 변형률을 고려하여 쉽게 산정할 수 있다. 이 값을 ③ 단계에서 수행된 다양한 조건에서의 이미지 해석결과와 비교하여 오차를 평가하였다. 그림 11에 0.14% 압축된 이미지를 사용하여 집합 크기 60 × 60pixel인 경우에 PIV 기법(bi-square 내삽법)으로 구한 오차 분포를 확률 밀도 함수를 이용하여 도시하였다. 이때 평균은 0.0009pixel, 표준편차는 0.0160pixel로 나타난다. 그림 6에서 설명된 90% 신뢰 구간에서의 최대 오차는 0.0271pixel로 계산된다. 즉 정밀도하게 측정 가능한 최소 단위는 0.0271 pixel이라고 할 수 있다. 이와 같은 방식으로 총 192회의 이미지 해석에 대한 90% 신뢰 구간에서의 최대 오차를 구하였고, 그림 12에서 17까지 다양한 변형을 간격에서 픽셀집합 크기와 이미지 해석 기법에 따른 오차를 도시하였다. y 축에 도시된 오차 값이 작을수록 정확도가 높은 것을 의미한다.

이미지 해석 조건은 2.3에 설명된 바와 같이 변형을 간격, 픽셀집합 크기, 해석 기법, 세 가지 영향 요소로 나누어 볼 수 있다. 전체적인 특성을 살펴보면 같은 변형을 간격에서는 압축과 인장 변형에 대한 이미지 해석의 오차는 매우 유사하게 나타났다. 즉, 변형 타입은 큰 영향이 없는 것으로 판단할 수 있다.

① 변형을 간격의 영향을 살펴보면 변형을 간격이 증가하면서 이미지 해석의 오차는 증가한다. 변형을 간격 0.07%에서는 최소로 나타난 오차가 0.0183pixel 인 반면, 2.2%의 변형을 간격에서는 0.0965pixel 까지 증가 했다. 즉, 변형을 간격이 작을수록 정확



(a) 압축



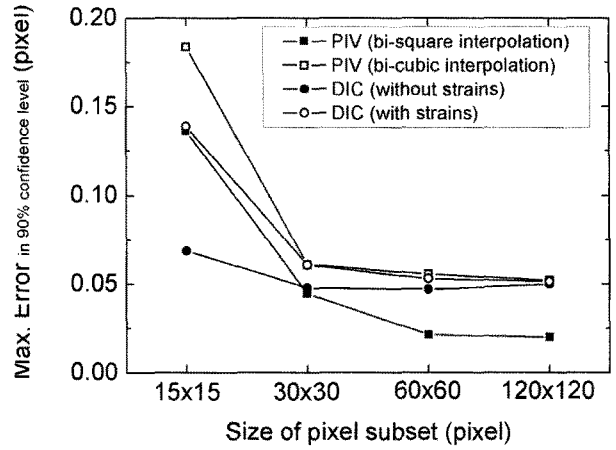
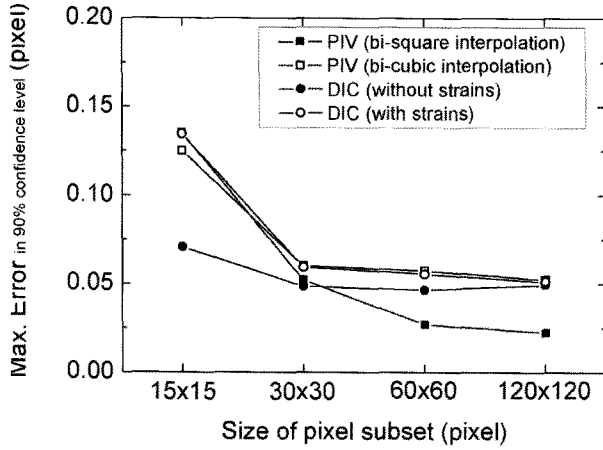
(b) 인장

그림 12. 변형률 간격 0.07% 이미지 해석의 오차

도가 높음을 알 수 있다.

- ② 픽셀 집합 크기가 이미지 해석에 미치는 영향을 평가하면, 그림 12와 13에 도시된 작은 변형률 간

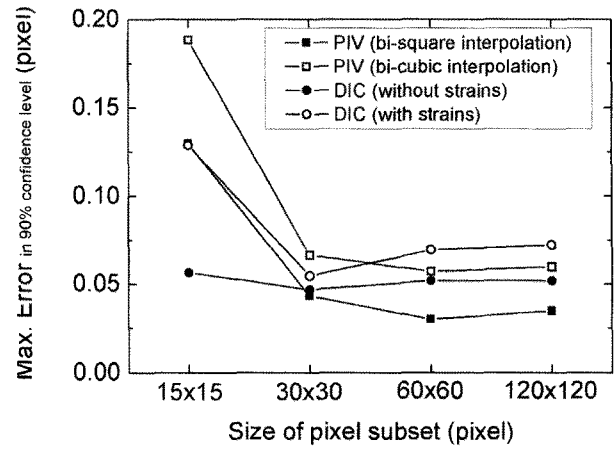
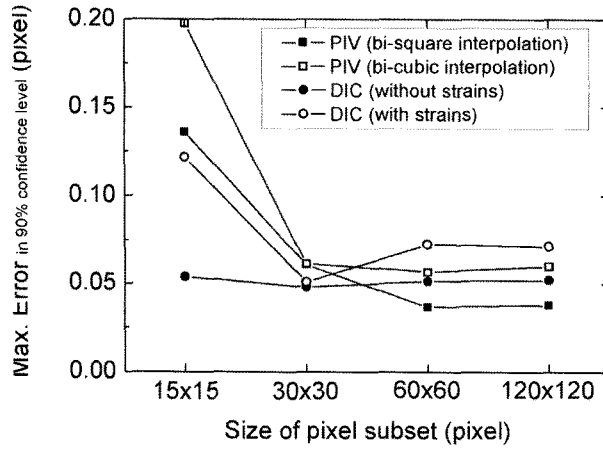
격에서는 픽셀집합의 크기가 클수록 이미지 해석의 정확도가 높다고 할 수 있다. 그러나 그림 14의 0.28% 변형률 간격에서 부터는 픽셀 집합 크기 60



(a) 압축

(b) 인장

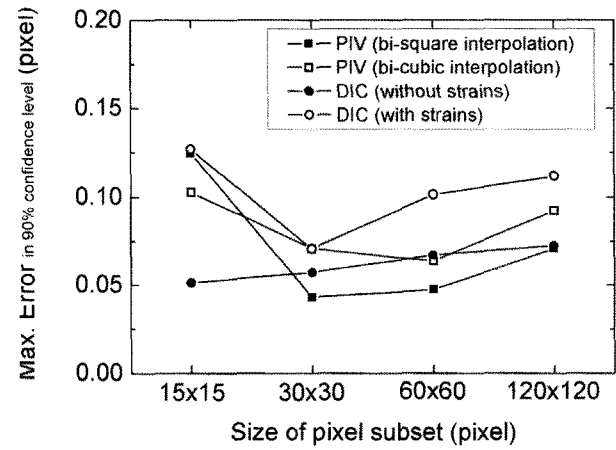
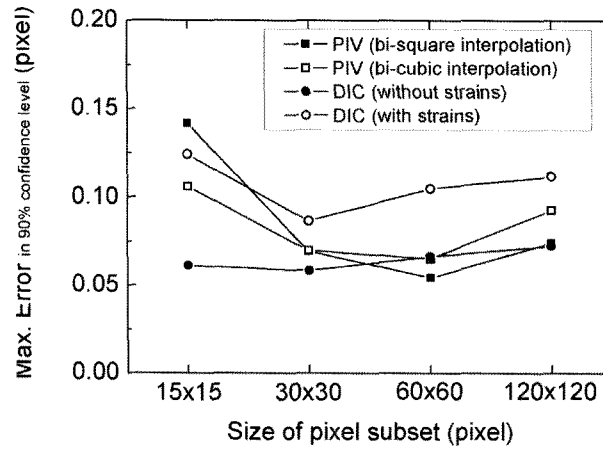
그림 13. 변형률 간격 0.14% 이미지 해석의 오차



(a) 압축

(b) 인장

그림 14. 변형률 간격 0.28% 이미지 해석의 오차



(a) 압축

(b) 인장

그림 15. 변형률 간격 0.56% 이미지 해석의 오차

× 60과 120 × 120 pixel에 따른 차이가 거의 나타나지 않는다. 그 이후 0.56% 변형률 간격에서는 작은 변형률 간격에서의 결과와는 반대로 픽셀 집합 크기 120 × 120pixel에서 60 × 60pixel에서보다 더 오차가 크게 나타났다. 그리고 그림 16과 17의 큰 변형률 간격에서는 픽셀 집합의 크기가 커질수록 오차가 증가하는 경향이 나타났다.

③ 이미지 해석 기법의 관점에서는 작은 픽셀 집합에서 bi-square 보간을 사용하는 PIV 기법이, 큰 변형률 간격에서 변형률을 고려하지 않은 DIC 기법이 더 정확한 결과를 도출하였다.

각 변형률 간격에서의 최적의 조건 및 그에 해당하는 90% 신뢰수준에서의 최대 오차를 pixel 단위로 표 2에

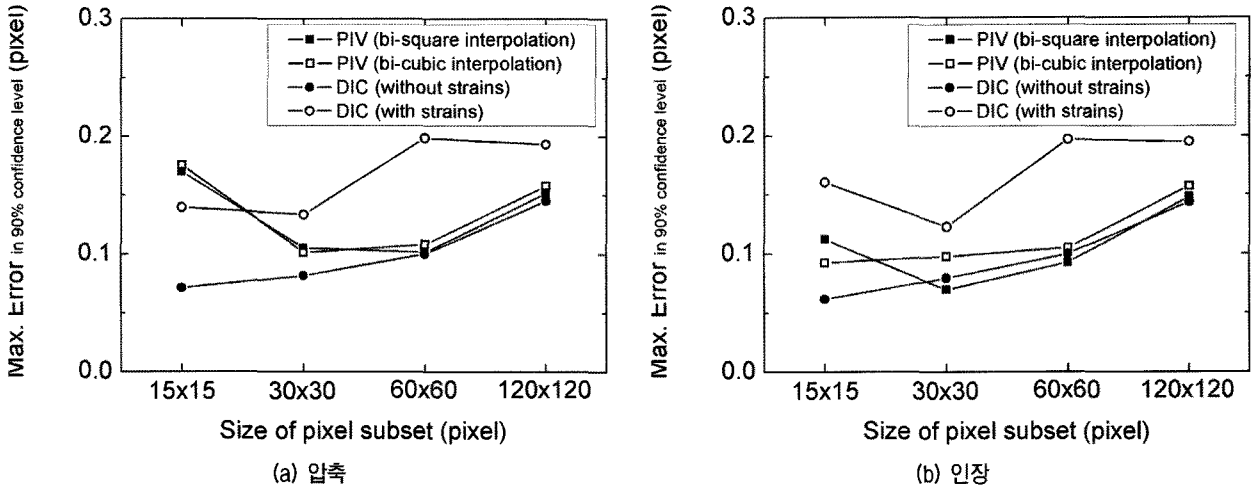


그림 16. 변형률 간격 1.1% 이미지 해석의 오차

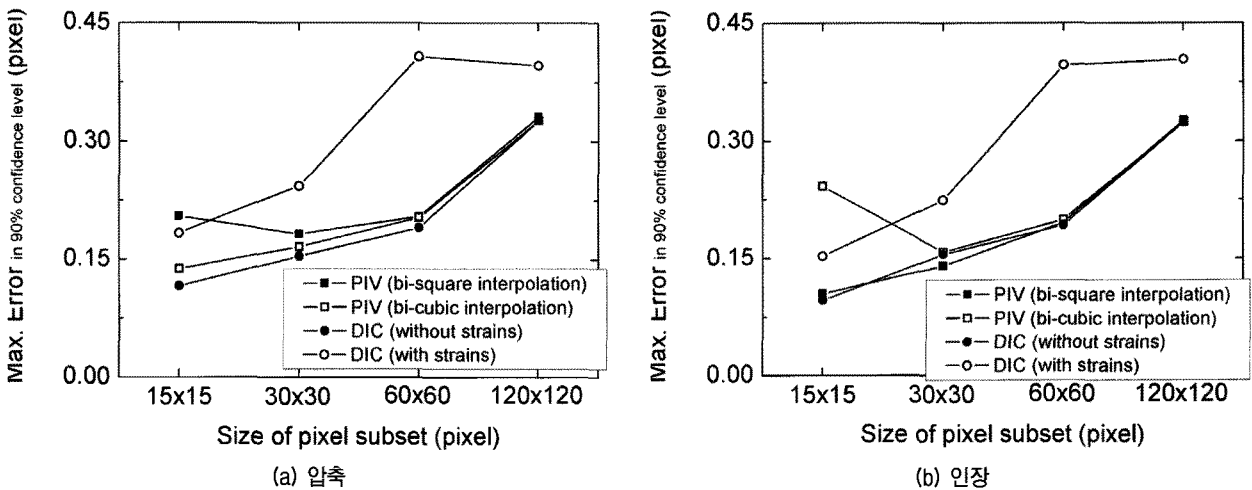


그림 17. 변형률 간격 2.2% 이미지 해석의 오차

표 2. 각 변형률 간격에서의 이미지 해석의 최적 조건 및 최대 오차

변형률 간격 (%)	해석 기법	픽셀 집합 크기 (pixel)	이미지 해석 최대 오차(90% 신뢰수준)		
			(pixel)	(mm)	(%)
0.07	PIV(bi-square)	120 x 120	0.0183	0.0010	0.0006
0.14	PIV(bi-square)	120 x 120	0.0225	0.0012	0.0008
0.28	PIV(bi-square)	60 x 60	0.0366	0.0019	0.0013
0.56	PIV(bi-square)	60 x 60	0.0545	0.0029	0.0019
1.1	DIC(without strains)	15 x 15	0.0712	0.0038	0.0025
2.2	DIC(without strains)	15 x 15	0.0965	0.0051	0.0034

정리하였다. 정확도는 인장과 압축시험 중에서 더 큰 오차를 적용하였다. 표의 내용을 정리하면 낮은 변형률 간격에서는 bi-square 보간을 사용하는 PIV 기법이, 높은 변형률 간격에서는 변형률을 고려하지 않은 DIC 기법이 정확하게 나타났다. 최적의 픽셀 집합 크기는 변형률 간격이 증가할수록 감소함을 확인하였다. 그리고 최적의 조건에서의 정확도는 변형률 간격이 증가함에 따라 낮아졌다.

⑤ 실제 길이 단위와 변형률 단위의 정확도를 산정 및 최적 조건 제안

이미지 해석의 최대 오차에 ① 단계에서 평가된 이미지의 해상도 0.0527mm/pixel을 고려하면 mm 단위로 환산이 가능하며, 시료 높이 150mm에 대한 전체 변형률 측정의 최대 오차도 % 단위로 표현이 가능하다. 이를 계산하여 표 2에 추가하였다.

합리적인 변형률 허용 오차를 0.001%로 정의하면 최적의 이미지 해석 조건은 변형률 간격 0.14% 이내에서 픽셀 집합 크기 120 × 120 pixel을 활용하여 bi-square 보간 PIV 기법으로 해석하는 것이다. 이 경우 90% 신뢰 수준에서 0.001% 이하의 오차로 정확하게 측정하는 것이 가능하다.

이상으로 본 연구에서 제안한 이미지 해석의 최적화 및 정확도 평가 절차를 그림 8의 점성토 시료에 적용한 결과, 각 변형률 간격에서 최적의 해석 조건을 선택함으로써 오차의 크기를 1/2~1/8 배 이상 줄일 수 있음을 그림 12~17로부터 확인하였다. 시료의 종류와 시료에 형성된 이미지 패턴에 따라 최적의 이미지 해석 조건이 달라질 수 있기 때문에, 이미지 해석을 활용하여 시료의 변형을 측정할 경우 본 연구에서 제안한 이미지 해석의 최적화 절차가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 이미지 해상도, 변위 및 변형 정도, 그리고 픽셀 집합의 크기 및 해석 기법 등과 같이 이미지 해석 기법의 정확도에 영향을 미치는 다양한 요소들을 정리하였다. 그리고 이들로부터 정확도 평가 및 최적의 이미지 해석 조건 결정 절차를 ① 이미지 해석을 위한 디지털 이미지 확보, ② 변형 이미지 확보, ③ 다양한 조건에서 이미지 해석의 수행, ④ 오차 평가 및 최적 조

건 결정, ⑤ 실제 길이와 변형률 단위의 정확도 평가의 5단계로 나누어 제안하였다. 본 연구에서 제안된 최적화 및 정확도 평가 절차를 이미지 패턴이 형성된 점성토 시료에 적용하였다. 주어진 해상도의 원본 이미지를 6개의 변형률로 변형시켜 4 가지의 해석 기법, 4 종류의 픽셀 집합 크기를 적용하여 압축과 인장 각각 96회, 총 192회의 이미지 해석을 실시하였다. 각 이미지 해석에서 얻은 100개의 픽셀 집합 중심점에서의 변위를 위치 좌표에 변형률을 고려하여 산정한 실제 변위와 비교함으로써 오차를 평가하였고, 그 결과는 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (1) 변형률 간격이 증가할수록 정확도가 감소(오차의 증가)하였으며, 같은 변형률 간격에서 압축과 인장 변형에 대한 이미지 해석의 정확도는 매우 유사하게 나타났다.
- (2) 작은 변형률 간격에서는 픽셀 집합의 크기가 클수록 이미지 해석의 정확도가 높으나, 변형률이 증가할수록 그러한 경향이 감소하고, 큰 변형률 간격에서는 오히려 픽셀 집합의 클수록 해석의 정확도가 낮았다.
- (3) 낮은 변형률 간격에서는 bi-square 보간을 사용하는 PIV 기법이, 높은 변형률 간격에서는 변형률을 고려하지 않은 DIC 기법이 정확하게 나타났다.
- (4) 본 연구에서 합리적인 변형률 허용 오차를 0.001%로 정의하였고, 이에 해당하는 최적의 이미지 해석 조건은 변형률 간격 0.14% 이내에서 픽셀 집합 크기 120 × 120 pixel을 활용하여 bi-square 보간 PIV 기법으로 해석하는 것이다. 이 경우 90% 신뢰 수준에서 0.001% 이하의 오차로 정확하게 측정하는 것이 가능할 것이다.

본 연구에서 제안된 정확도 평가 절차는 향후 수행될 흙의 변형을 측정하는 연구에 적용되어 이미지 해석의 최적 조건을 결정하고 그에 따른 정확도를 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 건설 환경 종합연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. 김준영, 장의룡, 윤찬영, 정충기 (2008), “이미지 해석을 통한 방사 배수 압밀조건의 점성토 변형 거동 평가”, *2008 대한토목학회 정기학술대회 논문집*, pp.889-892.
2. 장의룡, 추윤식, 이원택, 정충기 (2008), “디지털 이미지 코릴레이션 기법으로 평가한 평면변형률 시험의 단부 구속 효과”, *한국지반공학회논문집*, 제24권, 제7호, pp.25-36.
3. 장의룡, 정영훈, 정충기 (2009), “사질토의 변형 측정을 위한 최적의 디지털 이미지 해석 기법”, *한국지반공학회논문집*, 제25권, 제12호, pp.119-130.
4. Alshibli, K. A. and Sture, S. (1999), “Sand Shear Band Thickness Measurements by Digital Image Techniques”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.13, No.2, pp.103-109.
5. Taylor, J. R. (1999), *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. University Science Books, pp.128-129.
6. Leung, C. F. and Chow, Y. K. (2008), “Use of PIV to Investigate Spudcan-Pile Interaction”, *Proceeding of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vancouver, Canada, pp.721-726.
7. Rechenmacher, A. L. and Finno, R. J. (2004), “Digital Image Correlation to Evaluate Shear Banding in Dilative Sands”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.27, No.1, pp.1-10.
8. Samer, S., Maged, G. I., and Jinyuan, L. (2002), “Geotechnical properties of transparent silica”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, pp.111-124.
9. 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
10. Zhang, G. Hu, Y. and Zhang, J.M. (2009), “New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests”, *Journal of the International Measurement Confederation*, Vol.42, pp.87-96

(접수일자 2011. 5. 20, 심사완료일 2011. 7. 5)