

## 철근의 한계상태변형을 평가를 위한 이미지 프로세싱의 적용

김성도<sup>1</sup>, 정치영<sup>2</sup>, 우태련<sup>3</sup>, 정진환<sup>4\*</sup>

### Application of Image Processing Method to Evaluate Ultimate Strain of Rebar

Seong-Do Kim<sup>1</sup>, Chi-Young Jung<sup>2</sup>, Tae-Ryeon Woo<sup>3</sup>, Jin-Hwan Cheung<sup>4\*</sup>

**Abstract:** In this study, measurements were conducted by image processing to do an in-depth evaluation of strain of rebar in a uniaxial tension test. The distribution of strain and the necking region were evaluated. The image processing is used to analyze the color information of a colored image, so that the parts consistent with desired targets can be distinguished from the other parts. After this process, the image was converted to a binary one. Centroids of each target region are obtained in the binary images. After repeating such process on the images from starting point to the finishing point of the test, elongation between targets is calculated based on the centroid of each target. The tensile test were conducted on grade 60 #7(D22) and #9(D29) rebars fabricated in accordance with ASTM A615 standards. Strain results from image processing were compared to the results from a conventional strain gauge, in order to see the validity of the image processing. With the image processing, the measuring was possible in not only the initial elastic region but also the necking region of more than 0.5(50%) strain. The image processing can remove the measuring limits as long as the targets can be video recorded. It also can measure strain at various spots because the targets can easily be attached and detached. Thus it is concluded that the image processing helps overcome limits in strain measuring and will be used in various ways.

**Keywords:** Image processing method, Ultimate strain, Strain distribution, Strain measurement, Uniaxial tensile test

## 1. 서 론

철근콘크리트구조물의 설계법은 구성재료의 성질과 작용 하중의 특성 등에 관한 그 동안의 연구성과 등을 반영하여 여러 가지 설계법이 개발 및 적용되어왔다. 다양한 설계법 중 한계상태설계법이 가장 최근에 적용되기 시작한 설계법이다. 유사한 개념의 한계상태설계법일지라도 각 나라마다 규정하는 바가 조금씩 다르다. 한계상태설계법은 크게 Eurocode-2를 기반으로 한 설계법과 AASHTO를 기반으로 한 설계법으로 구분된다. 미국의 AASHTO는 크게 부재단위의 경험식을 위주로 설계법이 제정되어 있다. 그러나 유럽의 Eurocode의 경우, 재료모델을 이용한 부재해석 모델에 기반하여 설계법이 제정되었다. 특히 철근의 경우, 응력-변형률 관계에서 최대 응력에서의 변형률을 한계상태변형률로 정의하고, 한계상태

설계법에서 적용할 수 있는 최대 변형률로 규정하고 있다. 다양한 연구자들이 이러한 요구에 맞춰, 철근과 콘크리트의 거동에 대한 연구를 수행하고 있다. 그 중 철근의 거동에 대한 연구는 주로 철근의 응력-변형률 관계와 인장증강효과에 대한 연구, 철근 부착거동에 관한 연구 등이 수행되고 있다. 이러한 연구들을 수행함에 있어 다양한 계측방식과 새로운 계측 및 평가방법의 적용은 매우 중요하다.

일반적으로 철근의 변형률을 계측할 때 변형률 게이지(strain gauge)와 신율계(extensometer)가 사용된다. Fig. 1은 계측방법에 따른 계측결과의 차이를 개념적으로 나타낸 그림이다. 변형률 게이지는 다양한 구조실험에 사용되는데, 구조물의 국부적인 지점에 부착되고, 부착점의 변형률을 계측할

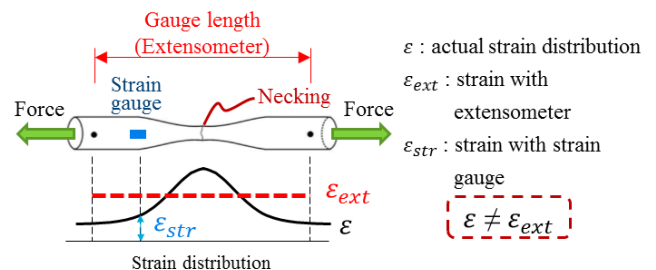


Fig. 1 Differences between actual strain and measured strain

<sup>1</sup>정회원, 경성대학교 건설환경도시공학부 토목공학전공, 교수

<sup>2</sup>정회원, 부산대학교 지진방재연구센터, 선임연구원

<sup>3</sup>학생회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과, 석박사통합과정

<sup>4</sup>정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 토목공학전공, 교수, 교신저자

\*Corresponding author: cheung@pusan.ac.kr

Department of Civil Engineering, Pusan National University 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, South Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

수 있다. 하지만 변형률 게이지의 경우 철근의 실제 파단시의 변형률보다 계측가능 범위가 매우 작기 때문에(소성변형률 게이지 0.2 이하) 탄성구간 이후 소성구간 평가에 적용하기에 적합하지 않다. 그리고 신율계의 경우에는 설치된 구간의 변형률을 환산하여 변형률로 나타내는데, 변형률 게이지와 달리 소성구간 평가에도 적용하기 적합하다. 그러나 설치구간의 평균 변형률만을 평가할 수 있고, 설치구간 내에서 임의 위치의 국부적인 변형률 측정은 불가능하다. 따라서 기존 변형률 계측 방법의 단점을 개선하고, 철근의 한계상태변형률에 대한 정확한 평가를 위해서는 다음과 같은 조건들이 만족하여야 한다. 첫째로 다수의 계측점에 대한 적용이 가능해야 하고, 둘째로 비교적 좁은 구간(10 mm 내외)에 대한 계측이 가능해야 한다. 셋째로 넥킹 또는 파단과 같은 모재의 대변형에 대한 계측이 가능해야 하며, 마지막으로 시료의 구분없이 높은 적용성을 가져야 한다. 이러한 조건들을 만족하고, 기존 변형률 계측 방법의 단점을 개선하기 위한 새로운 계측 방법이 연구되고 있다. 지난 몇 년 동안 많은 연구자들이 이미지 프로세싱을 이용한 계측방법을 제시하였다.

이미지 프로세싱을 이용한 변형률 계측에 관한 연구는 영상분석 방법에 따라 크게 세 가지로 구분될 수 있다. 1) 촬영된 영상 내의 타겟과 같은 기하학적 요소를 추적하는 방법과 2) 격자망을 이용한 방법, 그리고 3) 이미지 상관관계(image correlation) 분석을 이용한 방법이 있다. Cintron and Saouma (2008)은 Vic-2D 라는 이미지 상관관계를 이용한 변형률 계측에 대한 연구를 수행하였다. 해당 연구에서 시편 표면에 분사한 검정색 점들의 패턴을 사용하였고, 이를 이용하여 시편의 전체 표면에 대한 변형률 계측과 2 차원 변형률도를 제시하고자 하였다. 그러나 연구결과 실험체 표면에 균열이 발생한 이후에는 이미지 상관관계가 불가능하다는 점을 확인하였다.

Barranger et al.(2012)은 디지털 이미지 상관관계에서 고정된 패턴과 변형가능한 패턴의 결과물에 대한 영향도를 분석하였다. 해당 연구는 변형가능한 패턴과 고정된 패턴이 유사하다는 결과를 얻었다. 결과적으로 이미지 상관관계에서 패턴의 종류에 따른 영향보다는 과도한 변형에 따른 패턴의 상관성 저하가 결과분석에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Germaneau et al.(2008)은 X-ray로 촬영한 이미지에 대해서 체적 상관관계 연산을 수행하고, 3차원 변형측정 연구를 수행하였다. 주요 변수로 미세전산화단층촬영(micro-computed tomography)과 광학주사단층촬영(optical scanning tomography)을 대상으로 하였으며, 각 촬영방법에 대한 오차를 비교하였다. 연구결과 상대적으로 큰 변형률에서 오차가 커지는 것을 확인하였으나, 3차원 변형 계측에 대한 적용성을 확인하였다.

Wahbeh et al.(2003), Lee and Shinozuka(2006), Choi et al.(2011)은 시료의 계측점에 타겟을 부착하고 타겟을 디지털

이미지로 취득하고 이미지 프로세싱을 이용하여 타겟의 변위를 계측하는 연구를 수행하였다. 연구결과를 통해서 타겟을 부착하는 방법이 기존의 변위계를 이용한 방법보다 적용성이 우수함을 확인할 수 있었고, 동등 수준의 정확도를 확인하였다.

상기 거론한 이전 연구결과로부터 이미지 상관관계 방법이 변형률과 변위계측에 있어 매우 유용한 방법임을 확인할 수 있었다. 그러나 공통적으로, 대상 시험체 형상이나 표면상태에 과도한 변형이 발생하게 되면, 계측 오차가 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 철근과 같이 넥킹 구간에서 과도한 변형이 발생하는 시험체에서 좀 더 안정적인 변형률 계측을 위해서는 이미지 상관관계 방법보다는 시험체 표면에 부착된 타겟을 이용한 방법이 더 적합할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 철근의 변형률 계측 및 구간별 변형률 분포를 분석하고, 넥킹구간에서의 파단시까지의 변형률을 계측하기 위해서 이미지 프로세싱 방법을 적용하고자 한다. 타겟이 부착된 철근에 대한 이미지 프로세싱 방법을 이용한 변형률 계측은 계측범위의 제한이 없고, 계측 구간의 구분이 수월한 장점을 갖는다. 시험은 ASTM A 615 기준에 따라 생산된 grade 60 D22(#7)와 D29(#9) 철근에 대해서 ASTM A 370에 따라 수행하고, 변형률 계측은 이미지 프로세싱방법과 기존 변형률게이지 방법을 이용하여 결과를 상호 비교하고자 한다.

## 2. 철근의 한계상태 변형률 측정을 위한 이미지 프로세싱 방법

### 2.1 이미지 프로세싱 알고리즘

타겟을 이용한 이미지 프로세싱 방법들은 영상의 각 프레임에 대해서 타겟을 인식하고 해당 타겟 영역의 특성값(면적, 도심, 직경 등)을 산출한다. 타겟을 인식하고 영상내에서 타겟의 위치를 파악하는 방법은 크게 두 가지가 있다. 하나는 상관성(coherence) 분석을 통하여 영상 내에서 타겟과 가장 일치하는 위치를 산출하는 방법이고, 다른 하나는 영상 처리를 통하여 사용자가 원하는 타겟만을 참값으로 표현하는 방법이다.

먼저 상관성분석을 이용한 방법은 비교적 정확하게 타겟의 위치를 파악할 수 있고, 타겟의 형상 및 배치를 특징화하여 타겟의 인식률을 높일 수 있는 장점이 있다. 하지만 수학적 알고리즘이 복잡하여 연산에 비교적 많은 시간이 소요된다. 또한 영상 내에 다수의 타겟을 배치할 경우 타겟이 모두 다른 특징을 가져야 하며 타겟의 개수만큼 비례하게 또는 그 이상으로 연산시간이 소요된다.

영상처리를 통하여 타겟만을 참값으로 표현하는 방법은 주

로 촬영된 영상을 이진영상화(binary image)하는 방법이다. 일반적으로 영상의 각 프레임의 칼라영상을 회색조영상으로 변경하고, 이를 다시 임의의 경계값을 기준으로 이진영상으로 변환한다. 이진화된 영상에서는 타겟만이 참값(true, 1, 흰색)으로 표현되게 하도록 영상처리를 수행한다. 영상 내에서 타겟이 두드러지게 대비되게 하여 촬영한 영상에서 주로 사용하는 방법이다. 상관성 분석에 비해서 수학적 알고리즘이 간단하고, 영상내에 위치한 다수의 타겟에 대해서 단일연산으로 분석이 가능한 장점이 있다. 그러나 타겟간의 구분을 위해선 별도의 연산이 필요하며, 분석자가 설정하는 경계값에 따라서 최종 변환된 영상의 결과물이 큰 차이를 보이게 된다. 또한 주변부의 사물과 밝기에 따라 타겟을 구분하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. Fig. 2는 시료에 부착된 흰색 타겟 이미지를 경계값을 달리하여 얻어진 결과물을 나타낸 것이고, Fig. 3은 주변부 및 시험체의 반사광에 따라 최종 변환된 이진

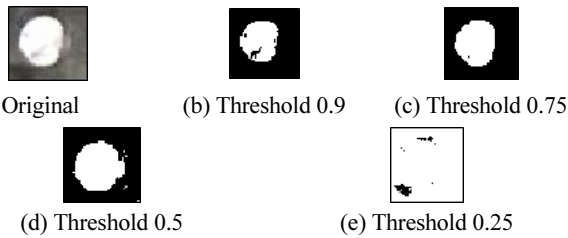


Fig. 2 Image processing results with gray scale depending on thresholds



Fig. 3 Inaccurate image processing results due to circumstance and light conditions

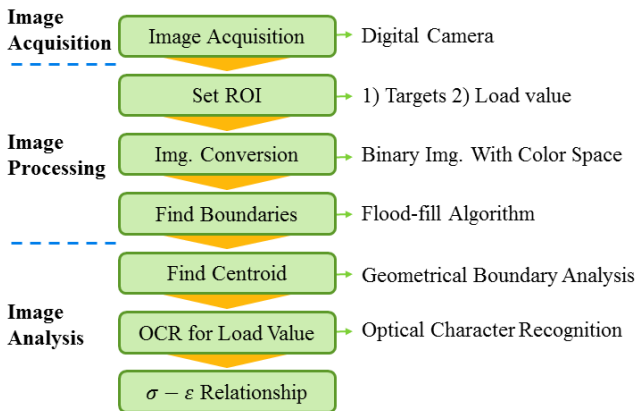


Fig. 4 Algorithm for measuring strain using image processing

영상에서 타겟이 구분되지 않는 경우를 나타낸 것이다. 이는 사용자로 하여금 최적결과를 도출하기 위한 시행착오를 유발할 수 있다.

본 연구에서는 이미지 프로세싱 방법으로 칼라영상의 색상 정보를 분석하여, 원하는 타겟과 가장 일치하는 영역과 그 외의 영역으로 구분하여 이진영상으로 변환하는 방법을 사용하였다. Fig. 4는 본 연구에서 적용한 이미지 프로세싱의 알고리즘을 나타낸 것이다. 알고리즘은 이미지를 취득하는 단계와 영상처리를 통해 이진영상을 취득하는 단계, 그리고 이진영상에 대한 분석을 통하여 타겟의 도심점을 찾고 변형률과 응력 값을 산출하는 단계로 구성되어 있다.

## 2.2 영상취득 단계

본 연구에서 계측하고자 하는 변형률은 타겟간의 상대거리를 산출하여 계산할 수 있다. 변형률은 무차원의 변화량이므로, 영상에서 얻어진 상대거리는 타겟간의 실제 거리변화량이 아닌 영상내에서의 픽셀 갯수를 이용하여 산출될 수 있다. 따라서 본 계측 방법에서는 영상과 실물과의 스케일을 정확하게 판별하는 문제보다, 영상취득 단계에서 타겟들 사이의 분해능이 높은 영상을 취득하는 것이 더욱 중요하다. 이는 영상의 해상도가 높아야 한다는 것을 의미한다. 현재 디지털 캠코더에서 일반적으로 사용되는 Full HD 영상은 가로 1980 픽셀, 세로 1080 픽셀 길이다. 그러나 일반적으로 해상도 측면에서는 디지털 캠코더 보다 디지털 카메라가 선택의 폭이 넓으며, 단위화소 당 촬영기기 가격의 측면에서도 유리하다. 따라서 본 연구에서는 디지털 카메라를 이용하여 촬영하였다.

## 2.3 영상처리 단계

영상처리 단계에서는 먼저 취득된 영상을 기준으로 영상 내에서 표준이 되는 타겟을 선택한 후, 선택한 타겟의 색상정보를 추출한다. 추출된 색상정보를 기반으로 영상 내 각 픽셀들의 색상정보가 타겟의 색상과 얼마나 가까운가를 산정한다. 디지털영상에서는 RGB 색상공간이 가장 보편적으로 사용된다. RGB에서 R은 빨간색, G는 녹색, B는 파랑색을 의미하는데, RGB 각각을 하나 축으로 보고 특정색상에 대해서 3차원 색상공간 안에 위치로 표시할 수 있다. 그러나 Kaur and Kranti(2012)의 연구에 따르면 Lab 색상영역이 영상 내에서 색상을 구분하기에 적합하다는 연구결과를 발표하였다. Fig. 5는 Lab 색상공간을 나타낸 것이다. Lab 색상영역의 경우에는 RGB 색상영역과 달리 Lab 라는 축으로 3차원 색상공간을 정의한다. Lab 색상영역에서는 L 값을 이용하여 밝기를 나타내고, a와 b 값을 이용하여 채도를 구현하게 된다. 따라서 영상내에서 동일한 채도 값을 갖지만 밝기가 다른 색상에 대해

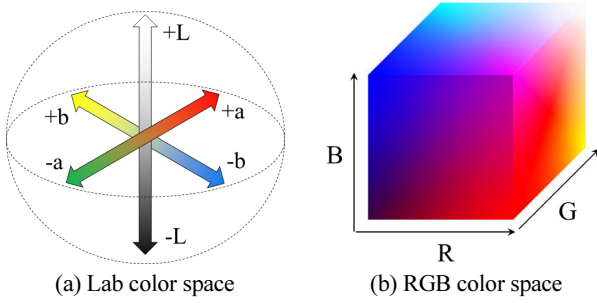


Fig. 5 Color spaces

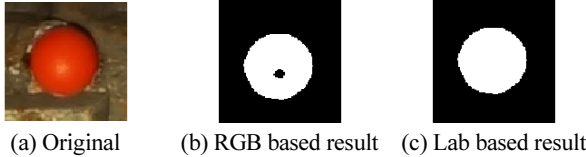


Fig. 6 Difference between binary images depending on the color space

서 더욱 정확한 구분이 가능하다. Fig. 5는 RGB 색상공간과 Lab 색상공간을 도시한 것이다. 본 연구에서 적용한 Lab 색상 영역에서 기준색상과 다른 색상을 구분하기 위한 수학적 알고리즘은 식 (1)과 같다.

$$D_i = \sqrt{(L_{ref} - L_i)^2 + (a_{ref} - a_i)^2 + (b_{ref} - b_i)^2} \quad (1)$$

여기서  $D_i$ 는  $i$  지점(픽셀)의 색상값과 표준색상이 얼마나 일치하는가를 나타내는 지표로, 값이 0에 가까울수록 유사함을 의미한다.  $L_{ref}$ ,  $a_{ref}$ 와  $b_{ref}$ 는 표준색상의 Lab 값을 의미하고,  $L_i$ ,  $a_i$ 와  $b_i$ 는  $i$  지점(픽셀)의 Lab 색상 값을 의미한다. 산정된 일치도에 따라서 참(true, 1, 흰색)과 거짓(false, 0, 검정색)으로 구분하여 이진영상으로 변환한다. Fig. 6은 Lab 색상영역을 기준으로 변환을 수행한 결과와 RGB 색상영역을 기준으로 변환한 결과를 비교한 것이다. Kaur and Kranti(2012)의 연구결과처럼 RGB 색상영역에서는 동일 색상의 밝기차이를 다른 색상으로 인식하여 타겟 내에 밝게 반사되는 위치가 인식되지 않는 문제가 있는 것을 알 수 있다. 상기 설명한 영상처리 단계를 시험의 시작시점 영상부터 종료시점 영상까지 반복하여, 전체 영상에 대한 이진화를 마무리한다.

## 2.4 영상분석 단계

영상처리 단계를 지나 영상분석 단계에서는 각 타겟 영역의 기하학적 도심을 산출한다. 산출된 타겟별 도심을 기준으로 타겟간의 상대거리를 산출하고, 초기 상대거리를 기준으로 하여, 각 구간별 변형률을 산출한다. 철근의 응력-변형률 관계를 도식하기 위해서는 철근의 변형률 뿐만 아니라 하중



Fig. 7 Example of OCR result

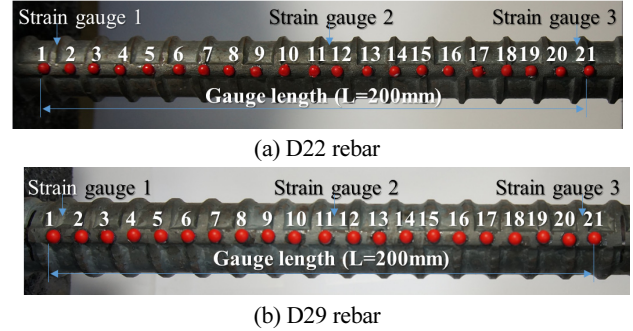


Fig. 8 Targets and strain gauges position on specimens

값도 취득이 가능해야하고, 이미지 프로세싱으로 얻어진 변형률과의 계측 시점에 대한 동기화가 매우 중요하다. 따라서 이미지 프로세싱을 이용한 변형률 계측과 데이터로거를 이용한 하중계측이 개별적으로 이루어질 경우 정확한 응력-변형률 관계 산출이 어렵게 되고, 이를 위한 후처리 과정이 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서 적용한 이미지 프로세싱 방법에서는 철근에 부착된 타겟과 로드셀에서 계측되는 현재 하중 값을 하나의 영상 안에 동시에 촬영하도록 하였다. 그리고 촬영된 하중 값에 대해서는 영상분석 단계에서 광학문자인식(Optical Character Recognition:OCR) 알고리즘(Smith et al., 2009)을 이용하여 수치화하였다. Fig. 7은 본 연구에서 적용한 OCR 결과의 예시를 나타낸 것이다. 상기 기술한 일련의 과정들을 거쳐서 본 연구에서 목적으로 하는 철근의 한계상태변형률 측정이 가능하게 하였다.

## 3. 철근 인장시험

### 3.1 시험체 및 시험상세

본 연구에서는 1축인장 상태에서의 철근의 극한거동과 변형률 분포 및 넥킹구간의 거동에 대한 평가를 위하여 인장시험을 수행하였다. 인장시험은 ASTM A 615 기준에 따라 생산된 Grade 60의 D22와 D29 철근을 대상으로 하였다. 인장시험



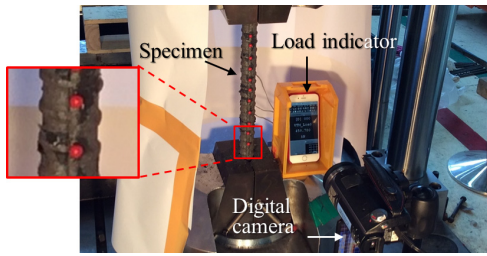


Fig. 9 Test and measurement set-up

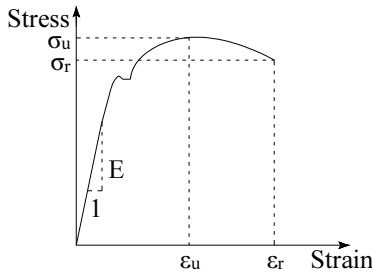


Fig. 10 Evaluation method of tensile test results

Table 1 Tensile requirements of grade 60 rebar in ASTM A 615

Yield strength( $f_y$ )	Ultimate strength( $f_u$ )	Elongation
Over 420 MPa	Over 620 MPa	D22 : over 8% D29 : over 7%

은 ASTM A370 기준에 따라 수행되었다. 따라서 모든 시편의 표점거리 기준은 200 mm로 설정하였고, 표점거리의 기준점에서 인장그립까지의 여유거리는 1D로 하였다. 1축 인장상태에서의 철근의 변형을 계측은 철근 표면에 부착된 타겟을 이용한 이미지 프로세싱 방법을 활용하였다. 이미지 프로세싱을 위하여 직경 4 mm의 반구형 타겟을 표점구간 내에 10 mm 간격으로 총 21개를 부착하였다. 타겟의 부착에는 기존 변형률 게이지를 부착할 때 사용하는 것과 동일한 접착제를 사용하였다. 촬영에는 2012년도에 출시된 SONY NEX-5R 디지털 카메라를 사용하였고, 16백만 화소(4912x3264 픽셀)의 크기로 매 2초 마다 등간격으로 촬영하였다. 촬영된 사진과 실물의 크기 비율(scale factor)은 약 0.055~0.059 mm/pixel을 유지하도록 영상 내에 동일한 기준점을 촬영영역으로 설정하였다.

이미지 프로세싱을 이용하여 얻어진 계측결과에 대한 검증을 위하여 변형률 게이지를 부착하여 비교값을 얻을 수 있도록 하였다. 변형률 게이지는 시편마다 3개씩 부착하였는데, 변형률 게이지 중 두 개는 표점거리 양 끝단에 부착하였고, 나머지 한 개는 철근의 중앙부에 부착하였다. 부착된 변형률 게이지는 계측 가능한 변형률 범위가 0.15~0.2까지인 소성 변형률 게이지를 사용하였고, 데이터로거(Tokyo Sokki TDS-303)를 이용하여 변형률 게이지와 UTM 로드셀의 신호를 계측하였다. Table 1은 ASTM A 615 기준에 정의된 철근 항복강도와 극

한강도를 정리한 것이다. Fig. 8은 타겟이 부착된 실험체의 모습을 나타낸 것으로, 시편체에 부착된 타겟 배치와 후면에 부착된 변형률 게이지의 위치를 확인할 수 있다. Fig. 9는 실험체의 설치 및 계측 모습을 나타낸 것이다. 철근 시편 우측에 배치된 하중 표시기(load indicator)는 UTM 로드셀에서 계측된 현재 하중 값이 실시간으로 표시되도록 하였다. Fig. 10은 응력-변형률 곡선에서 주요 물성치에 대한 정의를 나타낸 것이다.

### 3.2 시험결과 분석

#### 3.2.1 시험체별 파단형상

Fig. 11은 시험 종료 후 시험체별 철근의 파단 직전 변형 모습을 나타낸 사진이다. 일반적인 철근의 파괴거동 특성에 따라 특정 구간에서 넥킹현상이 발생한 것을 확인할 수 있다. 시험체 마다 넥킹구간은 불규칙한 위치에서 발생하며 파단시의 신장량은 동일한 시편 간에도 다소 차이가 있다. D22 철근의 경우에는 변형률 게이지의 부착위치와 넥킹구간의 위치가 일치하지 않아, 넥킹구간에서의 변형률은 계측이 불가능하였다. D29의 경우에는 대부분의 시편에서 넥킹구간이 중앙부에 인접하여 발생하여, 변형률 게이지를 이용하여 넥킹구간과 인접한 구간에서의 변형률 계측이 가능하였다. 넥킹구간의 길이는 육안으로 확인한 결과 직경의 약 2~3배 정도로 평가된다.

#### 3.2.2 응력-변형률 관계

Fig. 12와 13은 이미지 프로세싱 방법으로 계측된 철근의 응력-변형률 관계를 나타낸 것이다. 시험체별로 개별 타겟을

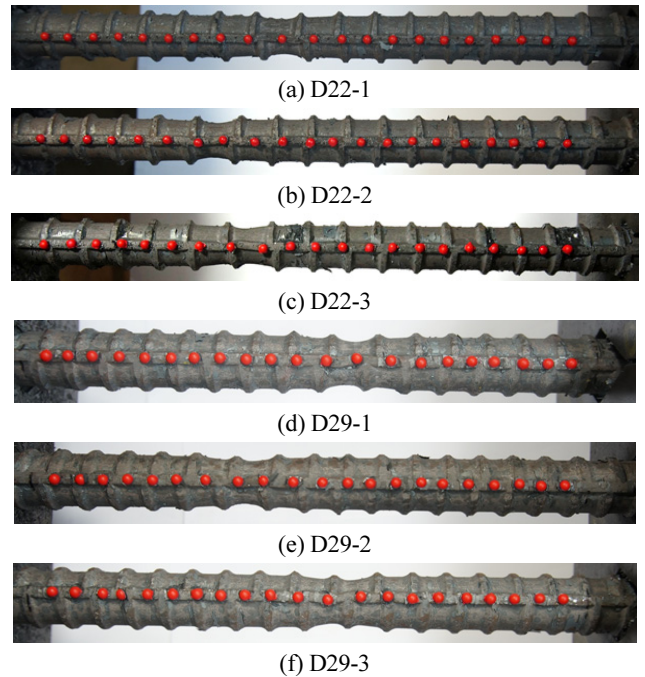
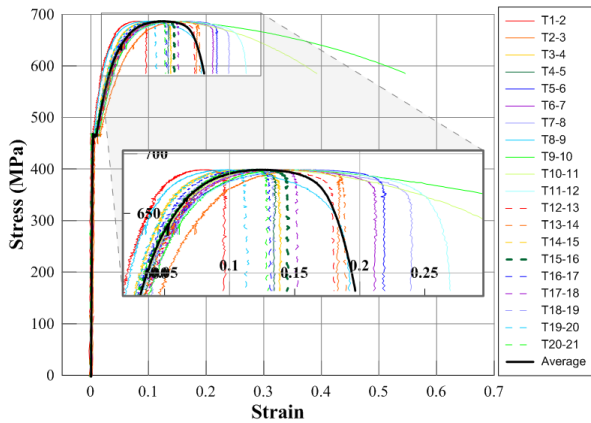
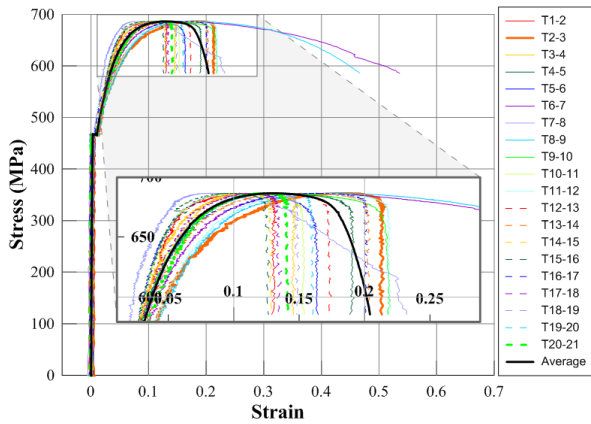


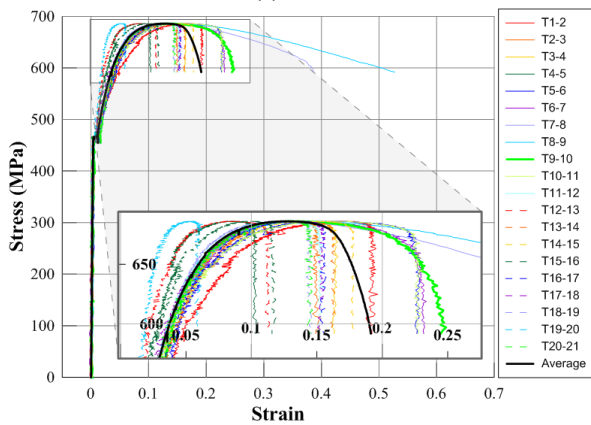
Fig. 11 Deformation and necking of rebar before rupture



(a) D22-1



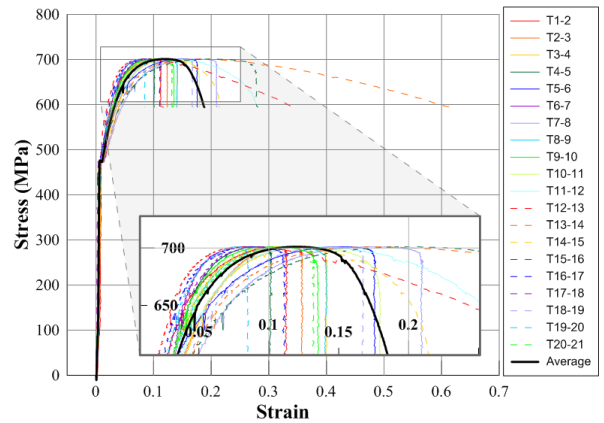
(b) D22-2



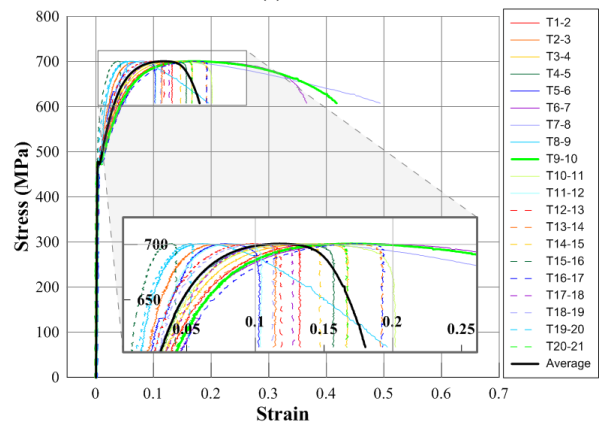
(c) D22-3

**Fig. 12** Stress-strain relationship of rebar measured with the image processing method(D22)

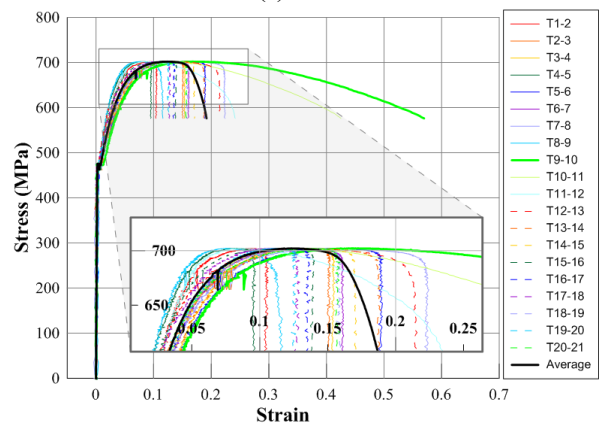
기준으로 구분되는 세부구간별 변형률 결과(T i-j)와 전체 타겟 구간에 대한 평균 변형률 결과(Average)를 도출하였다. 시험체의 응력산정 시 철근의 포아송비에 따른 단면적 감소는 고려하지 않았으며, 계측된 하중과 철근의 공칭단면적을 이용하여 산출하였다. 각 시험체의 응력-변형률 곡선에서 평균값은 전체 타겟 구간의 평균값을 의미하는 것으로 산술적으로 표점구간 내의 평균 변형률을 의미하게 된다. 이는 표점거



(a) D29-1



(b) D29-2



(c) D29-3

**Fig. 13** Stress-strain relationship of rebar measured with the image processing method(D29)

리의 신장량을 측정하여 변형률을 산출하는 신율계를 이용한 기존 방식과 동일한 평가 방식이다.

이미지 프로세싱으로 측정된 철근의 응력-변형률 곡선을 살펴보면, 먼저 초기 탄성구간에서의 기울기는 시편간에 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 철근이 항복한 후, 변형경화구간의 시작부터 각 구간별 변형률이 차이를 나타내기 시작하였다. 최종적으로 '넉킹'이 발생하는 구간에서 변형률이 다른

**Table 2.** Results measured with the image processing method

Specimen		$E(\times 10^5 \text{ MPa})$	$\sigma_u \text{ (MPa)}$	$\epsilon_u$	$\sigma_r \text{ (MPa)}$	$\epsilon_r$
D22	1	1.905	686.5	0.125	585.1	0.196
	2	2.097	686.3	0.132	585.6	0.204
	3	1.988	685.9	0.123	591.8	0.191
	Avg.	1.997	686.2	0.127	587.5	0.197
D29	1	1.855	701.1	0.117	594.2	0.187
	2	2.074	700.6	0.117	607.5	0.180
	3	2.091	702.1	0.118	576.1	0.192
	Avg.	2.007	701.3	0.117	592.6	0.186

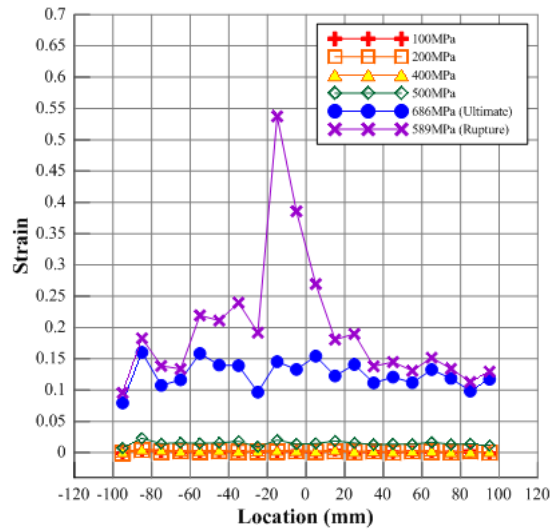
구간에 비해 매우 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 대부분의 시험체에서 넥킹구간에서 파단직전에 약 0.5~0.6 정도의 변형률이 발생함을 알 수 있었다. 표점구간 평균변형률은 약 0.15~0.2 정도로 나타났다. 넥킹구간의 변형률이 표점구간 평균 변형률의 약 3배 정도에 해당하는 크기를 나타내었다. 철근의 일부구간에서 넥킹현상이 발생한 이후에는 넥킹구간에 인접한 구간을 제외한 영역에서는 변형률의 증가가 매우 미소하고 변형률의 증가는 모두 넥킹구간에서 발생하는 것을 확인하였다. 이미지 프로세싱 방법을 통하여 철근의 국부적인 구간의 응력-변형률 관계를 확인할 수 있었으며, 각 구간별 차이를 비교할 수 있었다.

Table 2는 계측결과 값을 정리한 것으로, 표점구간내에서의 평균변형률을 평가하여 계측된 탄성계수 및 극한변형률과 파단변형률을 평가하였다. D22 철근과 D29 철근의 탄성계수는 약  $2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ 로 평가되었다. 극한변형률은 약 0.11~0.13 정도의 수준으로 나타났다. Eurocode 2에서는 철근 연성능력에 대한 기준으로 극한변형률이 0.075이상인 경우(Class C), 연성조건에 만족한다고 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서 시험한 철근의 경우 모두 약 2배 이상의 변형률을 가지며 연성조건에 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 파단변형률은 0.18~0.20 수준으로 나타나, ASTM A615에 정의된 최소 파단 변형률(D22: 0.07, D29: 0.08)을 모두 만족하는 것을 확인하였다.

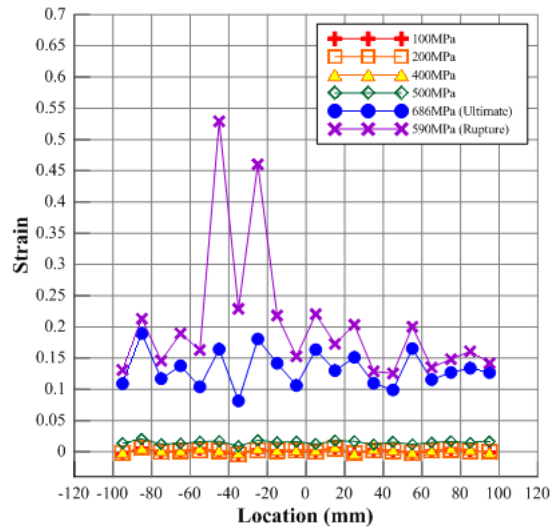
### 3.2.3 철근의 종방향 변형률 분포

철근의 응력수준에 따른 종방향 변형률 분포 및 이에 대한 변화를 비교하기 위하여 본 연구에서 수행한 철근의 종방향 변형률 분포를 응력단계별로 비교하였다. Fig. 14와 15는 그에 대한 결과물로서 응력단계는 100~600 MPa 구간을 균등하게 구분하고 극한강도와 파단시의 강도를 기준으로 도시하였다.

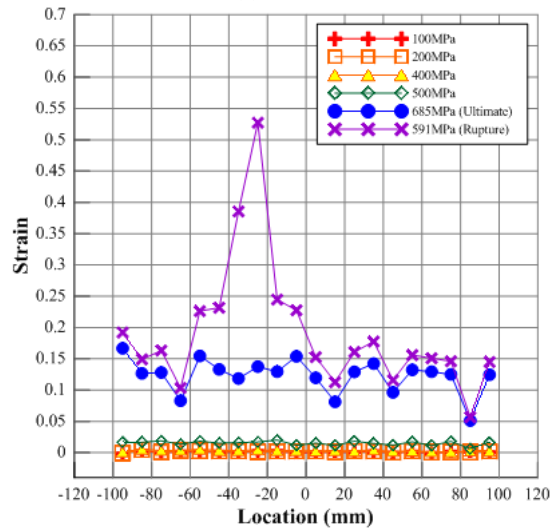
초기 탄성구간에서의 응력상태에서부터 극한상태까지의 변형률 분포를 살펴보면 철근마디의 영향에 따라 변형률의 분포가 종방향 위치에 따라 증감을 반복하는 형태를 보였다. 극한상태에서의 변형률 분포와 파단시점에서의 변형률 분포



(a) D22-1



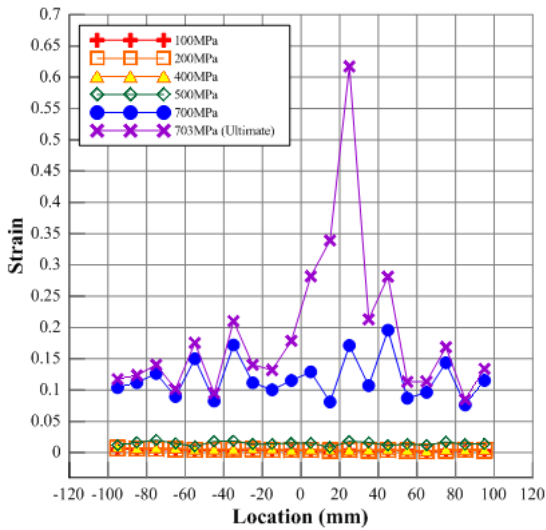
(b) D22-2



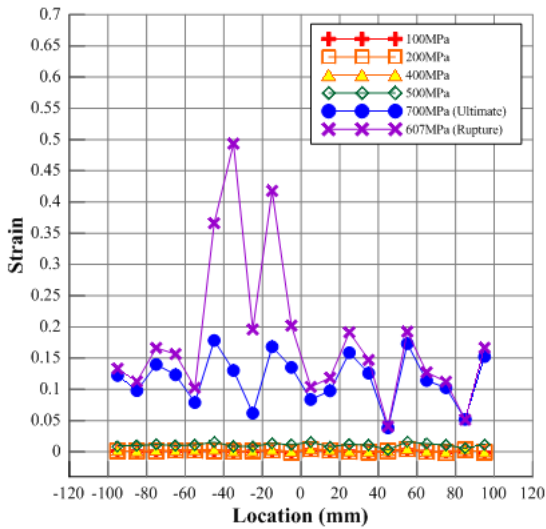
(c) D22-3

**Fig. 14** Strain distribution of D22 measured with the image processing method

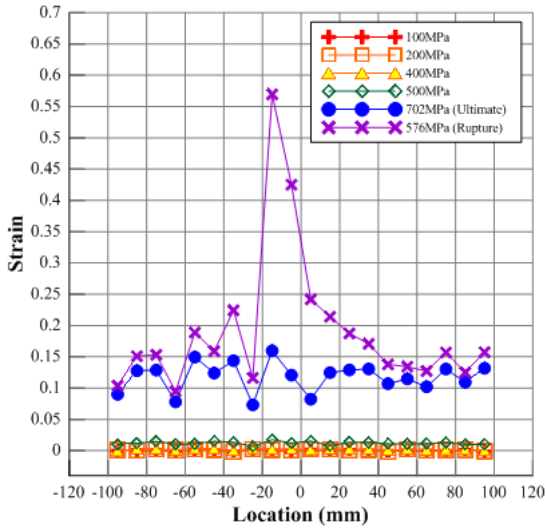




(a) D29-1



(b) D29-2



(c) D29-3

**Fig. 15** Strain distribution of D29 measured with the image processing method

차이를 통하여, 넥킹구간은 직경의 약 3배 정도의 길이를 갖는 것을 가능해볼 수 있었다. 그리고 극한상태에서 파단으로 넘어가는 과정에서 대부분의 변형은 넥킹구간에서 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 1축 인장시험으로 평가되는 철근의 극한변형률 및 파단변형률은 표점구간 내에서 넥킹구간의 위치와 넥킹구간이 표점구간에서 차지하는 비중, 그리고 넥킹구간에서의 최대 변형률에 큰 영향을 받을 것으로 판단된다. 본 연구에서 적용한 이미지 프로세싱 방법은 넥킹구간과 넥킹구간 이외의 구간에서의 변형률을 구분하여 평가할 수 있는 장점이 있어, 추후 철근의 파단거동 특성에 대한 연구에서 보다 상세한 평가가 가능할 것으로 기대된다.

### 3.3 이미지 프로세싱 분석결과의 정확도 평가

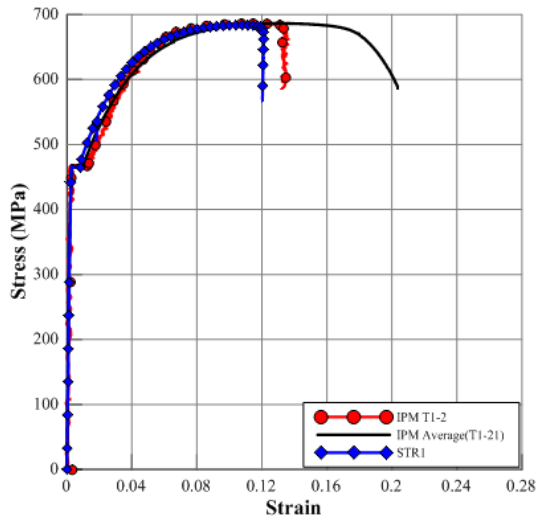
본 연구에서 적용한 이미지 프로세싱 방법의 정확도에 대한 평가를 위하여 변형률 게이지를 이용하여 계측된 결과와의 비교를 수행하였다. Fig. 16과 17에 철근의 1축 인장시험 중 변형률 게이지를 이용하여 측정된 철근의 응력-변형률 관계와 이미지 프로세싱을 통해서 얻어진 응력-변형률 관계를 비교하였다. 이미지 프로세싱을 통해서 얻어진 결과는 변형률 게이지가 부착된 위치와 동일한 구간의 결과를 비교하였고, 이미지 프로세싱을 이용하여 얻어진 표점구간내 평균 변형률을 같이 도시하였다. 이미지 프로세싱으로부터 얻어진 평균 변형률은 신율계를 이용하여 얻을 수 있는 표점구간내 평균 변형률과 같은 개념이다.

초기 탄성구간과 항복구간에 대한 평가는 각 측정방법에 따른 차이는 미소하였다. 그러나 변형률게이지의 측정한계 때문에 철근의 항복 이후에 측정된 변형률의 신뢰도가 다소 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 측정결과에서 확인할 수 있는바와 같이, 변형률게이지로 측정된 변형률은 철근의 극한 거동상태에서의 변형률을 측정하지 못함을 알 수 있다. Fig. 16 (b)와 Fig. 17 (a)-(c)는 모두 변형률 게이지가 시험 종료 전에 측정한계를 벗어난 경우들이다. 게이지에 따라서 측정한계는 0.15~0.25 수준으로 나타났다. 이는 변형률 게이지 제조사에서 제시하는 제품규격에 부합하는 결과로서, 부착자의 숙련도에 따라 다소 차이를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

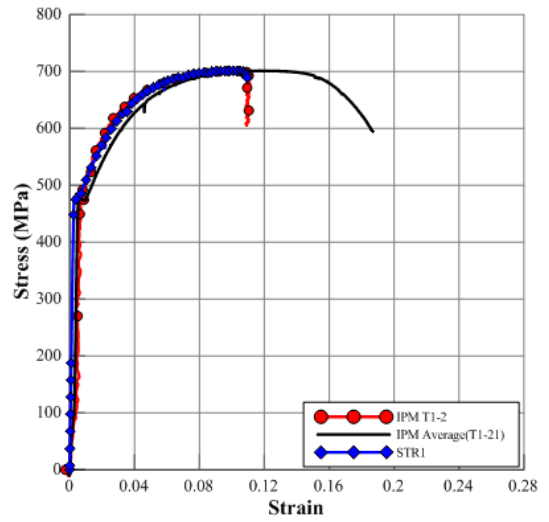
또한 불규칙한 위치에서 발생하는 넥킹구간의 특성 때문에 변형률 게이지를 넥킹발생위치에 정확하게 부착하기 어렵다는 것을 알 수 있었다. 그러나 만약에 넥킹발생위치와 변형률 게이지의 부착위치가 일치하더라도, 앞 절에서 살펴본 이미지 프로세싱 결과에 따르면 넥킹구간에서는 0.5 이상의 파단변형률이 발생하기 때문에 변형률 게이지로는 측정이 불가능하다는 것을 알 수 있다.

상기 결과에 따라 기존 변형률 게이지는 철근의 한계상태 변형률 측정에 부적합함을 알 수 있었고, 넥킹구간 평가를 위

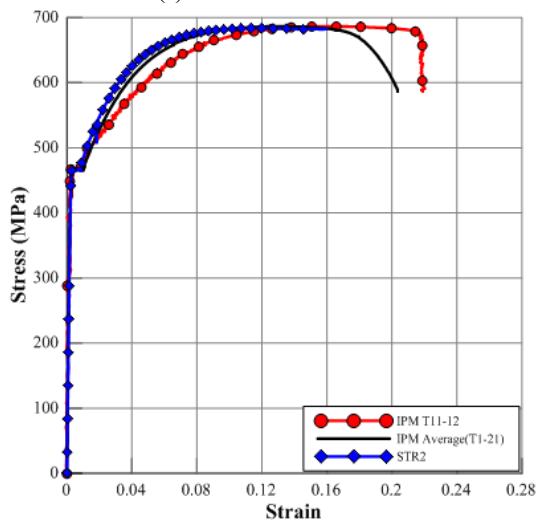




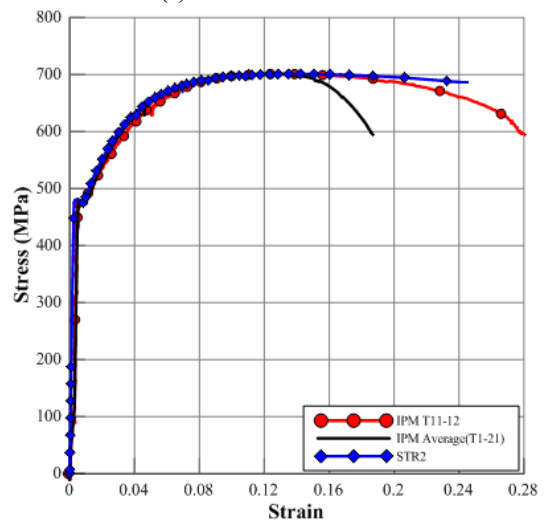
(a) IPM T1-2 and STR 1



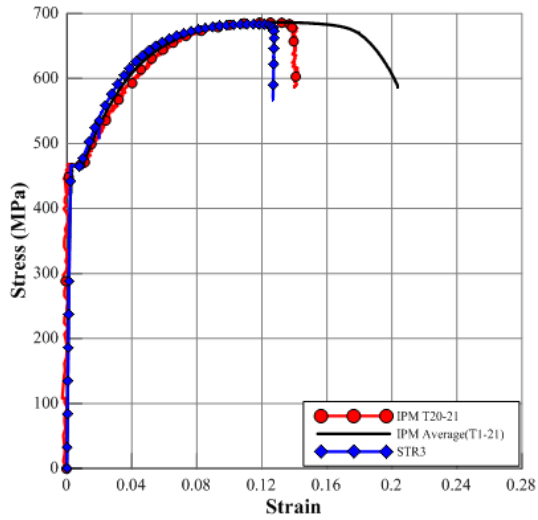
(a) IPM T1-2 and STR 1



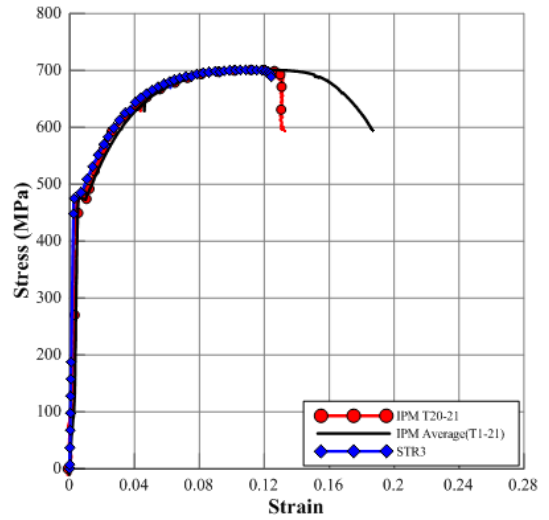
(b) IPM T11-12 and STR2



(b) IPM T11-12 and STR2



(c) IPM T20-21 and STR3



(c) IPM T20-21 and STR3

**Fig. 16** Comparison of image processing and strain gauge on stress-strain measurements (D22-2)

**Fig. 17** Comparison of image processing and strain gauge on stress-strain measurements (D29-1)

해서는 불확실성을 고려하여 많은 수의 변형을 게이지가 부착되어야 함을 알 수 있었다. 반면에 본 연구에서 적용한 이미지 프로세싱 방법의 경우 기존 변형률 게이지의 단점을 보완할 수 있었으며, 정확도 측면에서도 동등한 수준의 계측이 가능함을 알 수 있었다. 또한 비교적 손쉽게 부착이 가능하여 부착자의 순련도에 따른 오차도 개선이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 철근의 1축 인장시험에서 국부적인 변형을 보다 상세하게 평가하기 위하여 이미지 프로세싱 방법을 이용한 계측을 수행하고, 철근의 변형률 분포 및 넥킹구간에 대한 평가를 수행하였다. 시험은 ASTM A 615 기준에 따라 생산된 grade 60 D22(#7)와 D29(#9) 철근에 대해서 ASTM A 370에 따라 수행하고, 이미지 프로세싱을 이용하여 계측한 변형률 결과를 기존 변형률 게이지의 계측결과와 비교하여 이미지 프로세싱을 이용한 방법의 적용성을 확인하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

기존 변형률 게이지를 이용한 계측방법의 측정한계(최대 약 0.2)에 따라 철근의 넥킹구간이나 파단시점에서의 변형률 측정은 불가능하였다. 그러나 이미지 프로세싱 방법을 이용하여 철근의 변형률을 계측한 결과, 초기 탄성구간 뿐만 아니라 0.5 이상의 매우 큰 변형률이 발생하는 넥킹구간에서도 계측이 원활하게 수행되는 것을 확인할 수 있었다.

기존의 변형률 게이지 및 신율계는 불규칙한 위치에서 발생하는 넥킹구간에 대한 별도의 측정이 어렵고, 측정한계에 대한 불확실성이 존재한다. 그러나 이미지 프로세싱 방법은 타겟의 촬영이 가능하다면 측정 가능한 변형률의 한도에 대한 제약을 해소할 수 있고, 비교적 손쉽게 타겟의 부착이 가능하기 때문에 다양한 위치에서 발생하는 변형률 측정에 활용하기 유리할 것으로 판단된다.

또한 기존의 신율계를 이용한 변형률 평가 방법은 표점구간 내에서의 평균변형률만을 평가할 수 있으나, 이미지 프로세싱 방법은 표점구간의 평균변형률 뿐만 아니라 표점구간 내에서 세부구간별 평가가 용이한 장점을 갖고 있다. 따라서 이미지 프로세싱 방법을 이용할 경우 기존 연구에서 제약사항이 될 수 있었던 변형률 계측 문제를 해소할 수 있어서 활용 범위가 다양할 것으로 기대된다.

마지막으로 향후 연구에서는 이미지 프로세싱 방법을 다양한 계측 대상과 환경에 적용하여 적용성에 대한 분석 및 문제점에 대한 도출이 필요하며, 이미지의 해상도에 따른 노이즈 문제를 해결하기 위한 방안과 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

#### References

1. American Society for Testing and Materials International, Standard specification for deformed and plain carbon-steel bars for concrete reinforcement: ASTM A615/A615M-15; 2015.
2. American Society for Testing and Materials International, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products: ASTM A370-14, 2014.
3. Barranger, Y., Doumalin, P., Dupre, J. C., Germaneau, (2012), A. Strain Measurement by Digital Image Correlation: Influence of Two Types of Speckle Patterns Made from Rigid or Deformable Marks. *Strain*, 48, 357-65.
4. Choi, H. S., Cheung, J. H., Kim, S. H., Ahn, J. H. (2011), Structural Dynamic Displacement Vision System Sing Digital Image Processing, *NDT&E International*, 44, 597-608.
5. Cintron, R., Saouma, V., (2008), Strain Measurement with the Digital Image Correlation System Vic-2D. Center for Fast Hybrid Testing NEES at CU Boulder.
6. Germaneau, A., Doumalin, P., Dupre, J. C. (2008), Comparison between X-ray Micro-computed Tomography and Optical Scanning Tomography for Full 3D Strain Measurement by Digital Volume Correlation, *NDT&E International*, 41, 407-15.
7. Ji, Y. F., Chang, C. C. (2008), Nontarget Image-based Technique for Small Cable Vibration Measurement, *Journal of Bridge Engineering*, 13(1), 34-42.
8. Kaur, A., and Kranti, B. V. (2012), Comparison between YCbCr Color Space and CIE Lab Color Space for Skin Color Segmentation. *International Journal of Applied Information System*, 30-36.
9. Lee, J. J., Shinozuka, M. (2006), Real-time Displacement Measurement of Flexible bridge using Digital Image Processing Techniques. *Experimental Mechanics*, 46(1), 105-14.
10. Smith, R., Antonova, D. and Lee, D. (2009), Adapting the Tesseract Open Source OCR Engine for Multilingual OCR. *Proceedings of the International Workshop on Multilingual OCR 2009*, Article No. 1.
11. Wahbeh, AMazen, Caffrey John P, Masri Sami F. (2003), A Vision-based Approach for the Direct Measurement of Displacements in Vibrating Systems, *Smart Materials and Structures*, 12(5), 785-94.

Received : 02/15/2016

Revised : 04/11/2016

Accepted : 04/21/2016

---

**요 지 :** 본 연구에서는 철근의 인장시험에서 변형률에 대한 상세 측정을 위하여 이미지 프로세싱을 이용하고, 변형률 분포와 넥킹구간을 평가하였다. 이미지 프로세싱 방법으로는 기존의 회색조영상을 이용한 방법이 아닌 칼라영상의 색상정보를 분석하여, 원하는 타겟과 가장 일치하는 영역과 그 외의 영역으로 구분하여 이진영상으로 변환하는 방법을 사용하였다. 변환된 이진영상에서 개별 타겟들의 도심점을 산출한 후 각 도심점의 상대변위값을 변형률로 환산하였다. 인장시험은 ASTM A615 기준으로 제작된 grade 60 철근 중 D22와 D29에 대해서 시험을 수행하였다. 이미지 프로세싱을 이용하여 계측된 변형률 결과를 기존 변형률 게이지를 이용하여 계측한 결과와 비교하여, 본 연구에서 사용한 이미지 프로세싱 방법에 대해서 검증하였다. 이미지 프로세싱을 이용하여 초기 탄성구간의 변형률 뿐만 아니라 넥킹구간에서 발생한 0.5 (50%) 이상의 변형률도 계측이 가능한 것을 확인하였다. 본 연구결과 이미지 프로세싱을 통하여 기존 변형률 게이지의 계측한계를 극복가능하고, 다양한 지점에서 자유롭게 계측할 수 있음을 알 수 있었다.

**핵심용어 :** 이미지 프로세싱, 한계상태변형률, 변형률 분포, 변형률 계측, 인장시험

---