



## 영상분석기법을 이용한 철근의 변형률 및 넥킹구간 평가

정진환<sup>1)</sup> · 이종한<sup>2)</sup> · 우태련<sup>1)</sup> · 정치영<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 사회환경시스템공학과 <sup>2)</sup>대구대학교 토목공학과 <sup>3)</sup>부산대학교 지진방재연구센터

### Evaluation on Strain and Necking Region of the Rebar by Using Image Processing Method

Jin-Hwan Cheung,<sup>1)</sup> Jong-Han Lee,<sup>2)</sup> Tae-Ryeon Woo,<sup>1)</sup> and Chi-Young Jung<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan 38453, Rep. of Korea

<sup>3)</sup>Seismic Simulation Test Center, Pusan National University, Yangsan 50612, Rep. of Korea

**ABSTRACT** This study conducted uniaxial tension tests on D10, D19, D29, and D35 SD400 steel-grade rebar and evaluated the strain distributions and necking regions to provide basic data for resolving differences between evaluation methods. Owing to the limitations of the existing measurement methods, this study conducted detailed evaluations of the strain of the rebar and necking regions using image processing, which is almost limitless on the measurement range and can easily distinguish measurement regions. The strain was concentrated at the region where necking occurred when the rebar approached its ultimate strength, which was successfully confirmed through image processing. The correlation between the length of the necking region and the diameter of the rebar could be analyzed by evaluating the necking region that occurs during the ultimate behavior of the rebar. According to the results, the length of the necking region is around 1.5~2.5 times the diameter of the rebar.

**Keywords** : strain, rebar, strain distribution, necking, image processing method

### 1. 서 론

철근콘크리트구조물을 설계함에 있어 현재까지 다양한 설계법들이 제시되었다. 각 설계법은 재료 및 하중 특성 등에 관한 연구를 반영하여 발전되어 왔다. 작용하는 하중에 의해 단면에 발생하는 최대 응력이 각 구성 재료의 허용응력을 초과하지 않도록 하는 허용응력설계법(ASD 혹은 WSD), 단면을 구성하는 재료의 최대 저항능력에 단면력의 종류에 따른 강도감소계수를 적용하고 작용하는 하중의 특성에 따라 하중계수를 적용하여 적절한 안전수준을 결정하는 강도설계법(Strength Design Method, SD)이 대표적인 기존의 설계법이다. 그러나 이들 설계법은 구조물에 작용하는 하중과 재료 강도의 불확실성과 변동성을 적절하게 반영하는데 한계를 갖고 있어, 확률론에 근거한 신뢰도기반의 한계상태설계법이 대안으로 제시되고 있다. 한계상태설계법(Limit State Design Method: LSD) 또는 하중저항계수설계법

(Load Resistance Factor Design Method: LRFD)에 대한 관심은 유럽 및 미국 등지에서 일찍이 시작되었고, 각 국가들은 실정에 맞는 한계상태설계법 및 하중저항계수설계법을 제정하여 적용하고 있다. 국제표준화기구는 1995년에 한계상태설계법을 건설설계 분야의 국제표준으로 채택하였고, 현재까지도 이를 유지하고 있다.<sup>1,2)</sup>

ASD의 경우, 철근의 항복강도에 안전률을 고려하여 허용응력을 산정하도록 하고 있으며, SD의 경우에는 철근콘크리트 단면이 가질 수 있는 이론적인 최대 저항능력, 즉 공칭강도의 산정에서 철근의 항복강도를 사용하고 있어, 두 설계법 모두에서 철근의 변형능력에 대한 고려가 부족한 것으로 판단된다. 그러나 성능기반설계법인 철근 콘크리트 구조물의 한계상태설계법에서는 철근의 항복강도에 대한 인장강도의 비와 최대하중에서의 극한변형률 규정을 철근콘크리트 구조물의 요구 연성능력에 따라 달리하여 합리적인 설계가 가능하도록 하였다. 이러한 철근의 재료특성은 철근의 1축인장시험을 통하여 평가할 수 있다. 그러나 각 나라마다 규정하고 있는 철근의 1축인장시험방법은 상이한데, 주로 표점거리에서 큰 차이를 보인다. 이재훈 등(2011)<sup>3)</sup>은 철근의 연신율 평가기준 비교에 관한 실험적인 연구를 수행하였다. 해당 연구에서 ASTM, ISO, JIS, 그리고 KS 기준에 따라

\*Corresponding author E-mail : cyjung@pusan.ac.kr  
 Received August 25, 2016, Revised December 7, 2016,  
 Accepted December 8, 2016  
 ©2017 by Korea Concrete Institute

직경 10~29 mm 의 철근에 대해서 인장실험을 실시하고, 각 기준별 연신율 및 시험성공률에 대한 평가를 수행하였다. 연구에 따르면, 철근의 연신율은 동일한 지름의 철근이라도 적용하는 기준의 시험방법에 따라 상이한 결과를 나타낼 수 있고, 또한 표점거리 내부에서 파단된 시험편의 연신율이 표점거리 외부에서 파단된 시험편보다 높은 연신율을 나타낸다는 연구결과를 발표하였다.

이와 같이 철근의 연신율은 표점거리에 따라 달라질 수 있다. 이는 철근의 극한거동에서 발생할 수 있는 넥킹현상과 연관이 있으며, 시험방법에 따라 철근의 1축 인장거동에서 넥킹부가 차지하는 비중이 달라지기 때문인 것으로 추정된다. 동일한 철근에 대해서 시험방법에 따라 평가결과가 달라진다면, 구조물을 설계하거나 해석을 수행할 때 어떤 시험법에 따라 얻어진 결과를 적용해야 하는지 혼란이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 시험방법에 따른 평가결과의 차이를 해소하기 위한 노력이 필요한 현실이다.

본 연구에서는 시험기준에 따른 차이를 해소하기 위한 기초자료를 제시하기 위하여, 철근의 1축 인장 시험을 수행하고, 이에 대한 변형률 분포 및 넥킹구간에 대한 적절한 평가를 수행하고자 한다. 기존의 변형률계를 이용한 표점구간 내의 평균변형률 평가방법은 철근의 변형률 분포를 파악하기에는 부적합하다. 파단 후에 표점 사이의 길이를 측정하여 변형률을 평가하는 경우에는 탄성변형률에 대한 고려를 정확하게 하지 못한다. 또한 변형률계이지의 경우 측정범위가 최대 20% 정도이기 때문에 항복 이후의 변형률 측정에는 제한적일 수 밖에 없다. 기존의 계측방법이 갖는 제약사항 때문에 본 연구에서는 비교적 계측범위의 제한이 없고, 계측 구간의 구분이 수월한 이미지 프로세싱방법을 이용하여 넥킹구간의 변형률과 철근의 구간별 변형률을 상세하게 평가하고자 한다. 마지막으로 본 연구를 통하여 얻어진 결과를 이용하여, 철근의 1축인장시험에서 한계상태변형률을 합리적으로 정의하기 위한 평가방법을 제시하고자 한다.

## 2. 철근의 한계상태변형률 측정을 위한 이미지 프로세싱 방법

철근 콘크리트 구조물의 설계법이 강도설계법에서 한계상태설계법으로 발전되면서, 구조물 설계시 철근 변형률의 설계한계 값이 철근의 항복변형률에서 최대 하중에서의 변형률로 변경되었다. 이러한 철근의 재료적 특성은 철근에 대한 1축인장시험을 통하여 확인할 수 있다. 철근의 1축 인장시험은 국가마다 혹은 설계기준마다 다르게 수행되고 있는데, 주요한 차이는 표점거리를 들 수 있다. Fig. 1은 철근 직경별 시험기준 간의 표점거리차이를 비교한 것이다. ASTM의 경우 표점거리는 모든 직경에 대해서 200 mm로 동일하게 적용하고 있다. ISO는 모든 직경에 대해서 직경의 5배를 적용하고 있으며, KS와 JIS의 경우 직경에 따라 직경의 4~8 배를 적용하고 있다.<sup>4,7)</sup>

표점거리의 차이는 결국 연신율 평가에 영향을 미칠 수

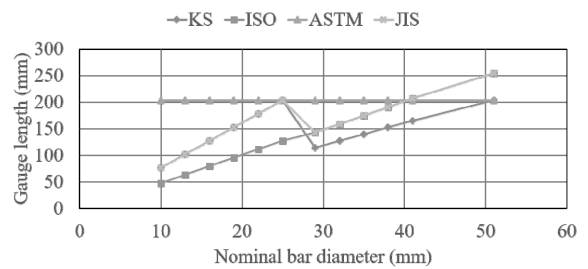


Fig. 1 Details of specimen

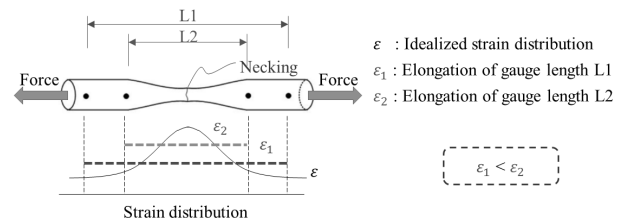


Fig. 2 Distribution of strain of rebar and difference of elongation depending on gauge length

있다. Fig. 2는 극한상태에서 넥킹이 발생했을 때의 이상화된 철근 응력분포와 이 때 표점거리( $L_1$ ,  $L_2$ )에 따른 계측연신율( $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ )의 차이를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 철근의 극한상태에서의 변형률은 측정 위치마다 다르며, 특히 넥킹부에서 매우 큰 변형률을 나타낸다. 표점거리 내에서 넥킹부가 차지하는 비중에 따라 계측연신율 값은 차이를 보이게 된다. 따라서 표점거리  $L_2$ 의 경우가 표점거리 내에서 넥킹부가 차지하는 비중이 크기 때문에 계측연신율이 더 크게 평가된다( $\epsilon_1 < \epsilon_2$ ). 이와 같이 동일한 철근에 대해서도 어떤 시험방법을 적용하는지에 따라 다른 결과를 얻게 되는데, 이는 시험결과를 활용하는 입장에서 적합한 결과가 무엇인지 결정하기에 어려움을 야기할 수 있다. 따라서 좀더 객관성 있는 철근의 연신율 평가 방법을 제시하여 시험방법에 따른 평가결과의 차이를 해소할 필요가 있다. 이러한 필요성을 충족하기 위해서는, 먼저 철근의 변형률 분포 및 넥킹구간의 연관성에 대한 평가가 이루어져야 하며, 이에 대한 적절한 평가방법이 제시되어야 한다. 본 연구에서는 이에 대한 방법으로 등간격으로 부착된 타겟을 촬영하여, 타겟들의 간격 변화량을 이미지 프로세싱을 이용하여 변형률로 환산하는 방법을 사용하고자 한다.

일반적으로 인장시험에서 시료의 변형률은 변형률계이지 혹은 연신율계를 이용하여 측정하나, 계측센서가 갖는 계측범위의 한계와 적용성의 제약 때문에 많은 연구자들이 이미지 프로세싱을 이용한 변형률 계측 방법을 대안으로 제시하고 있다.<sup>8-12)</sup> 본 연구에서는 Fig. 3에 도시한 색상 타겟을 이용한 이미지 프로세싱 방법을 사용하였다.<sup>13)</sup> 해당 방법은 먼저 인장시험 중 디지털 카메라를 이용하여 색상 타겟이 부착된 철근을 변형과정을 촬영한다. 그 다음 이미지 분석을 통하여 촬영된 영상을 이진영상으로 변환한 후, 촬영된 사진마다 타겟의 좌표값을 추출한 후, 변형률을 산출하고 변

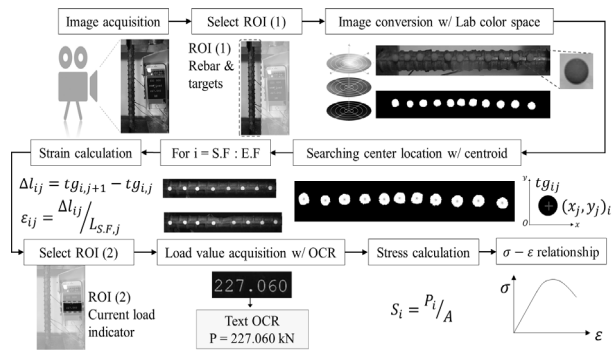


Fig. 3 Algorithm of image processing method using colored targets<sup>13)</sup>

형률로 변환한다. 또한 철근뿐만 아니라 만능재료시험기 (UTM)의 하중이 하중표시계를 통하여 영상 안에 표시되도록 하고, 영상처리 과정에서 영상 내에 촬영된 현재 하중 값을 광학문자인식 (Optical Character Recognition: OCR) 알고리즘을 이용하여 수치화한다. 이러한 과정을 통하여 최종적으로 철근의 응력-변형률 관계를 산출한다.

### 3. 철근의 인장시험

#### 3.1 시험체 및 시험상세

본 연구에서는 1축인장 상태에서의 철근의 극한거동과 변형률 분포 및 넥킹구간의 거동에 대한 평가를 위하여 인장 시험을 수행하였다. 인장시험은 KS D 3504 기준에 따라 생산된 SD400의 D10, D19, D29와 D35 철근을 대상으로 하였다.<sup>14)</sup> 인장시험은 ASTM A370 기준에 따라 수행되었다. 모든 시험편의 표점거리 기준을 200 mm로 설정하였고, 표점거리의 기준점에서 인장그립까지의 여유거리는 철근 공칭직경의 1배로 하였다. 1축 인장상태에서의 철근의 변형률 계측은 철근 표면에 부착된 타겟을 이용한 이미지 프로세싱 방

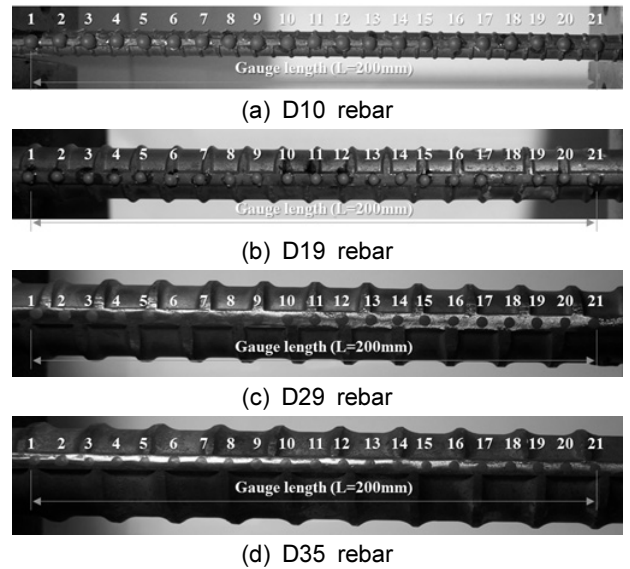


Fig. 4 Positions of targets

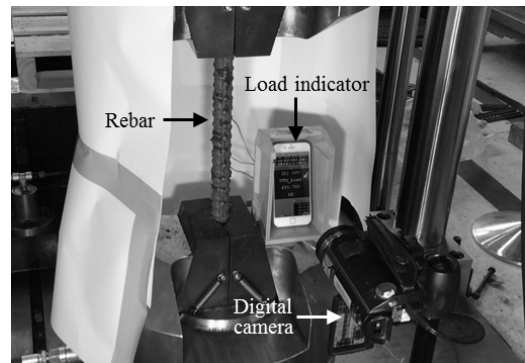


Fig. 5 Test and measurement set-up

법을 활용하였다. 이미지 프로세싱 방법을 위한 타겟은 표점구간 내에 10 mm 간격으로 총 21개가 부착되었다. 시험중 로드셀에서 얻어진 현재 하중을 작은 모니터에 표시하여, 타겟의 변화뿐만 아니라 현재 하중값도 한 화면에 촬영되도록 하였다. 촬영영상에 현재하중을 표시함으로써, 이미지 프로세싱으로 얻어진 변형률결과를 하중 및 응력결과와 보다 정확하게 비교가 가능하도록 하였다. 영상촬영은 SONY Alpha 7R 기준을 사용하였고, 해상도는 7360×4912 픽셀(36 백만화소)로 촬영하였다. 촬영에 사용한 기종의 경우 렌즈에 대한 왜곡보정을 자동으로 수행하도록 되어있다. 따라서 영상분석 시 추가적인 렌즈왜곡보정은 수행하지 않았다. Table 1은 KS D 3504기준에 정의된 철근 항복강도와 극한강도를 정리한 것이다. Table 2는 본 연구에서 대상으로 한 시험체의 특징을 정리한 것이다. Fig. 4는 타겟이 부착된 시험체의 모습을 나타낸 것이다. 인장시험은 1,000 kN 용량의 UTM을 이용하여 수행하였다. 가력방법은 ASTM에서 제시하는 바와 같이 응력증가 속도가 3~30 MPa/min의 속도를 유지하도록 하였다. 가력은 철근이 과단되는 시점까지 수행하였다. Fig. 5는 시험체의 설치 및 계측 모습을 나타낸 것이다.

Table 1 Tensile requirements of SD400 rebar in KS D 3504<sup>14)</sup>

Yield strength ( $f_y$ , MPa)	Ultimate strength ( $f_u$ , MPa)	Elongation
Over 400	Over 560	D10 and 19 : over 16% D29 and 35 : over 18%

Table 2 Details of specimens

Diameter	Nominal diameter ( $D_{norm}$ , mm)	Gauge length (mm)	Target amount	Distance from gauge length to grip (mm)	Number of specimens
10	9.5	200	21	10	3
19	19.1			19	
29	28.6			29	
35	34.9			35	

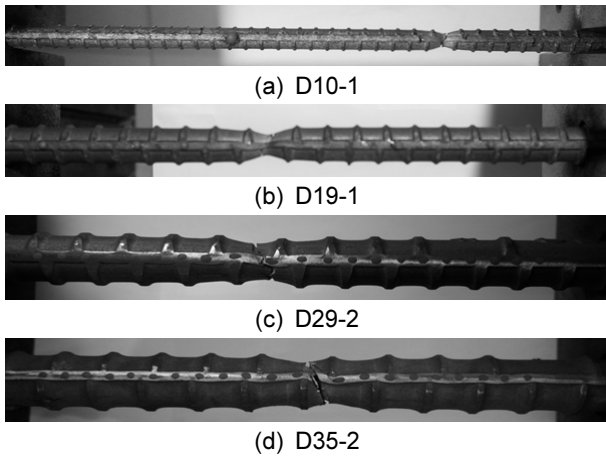


Fig. 6 Deformation and necking of rebar after rupture

### 3.2 시험결과 분석

#### 3.2.1 시험체별 파단형상

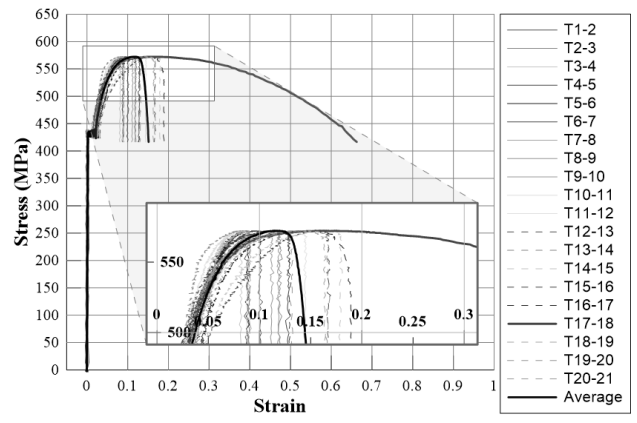
Fig. 6은 시험 종료 후 직경별 대표 철근의 파단 모습을 나타낸 사진이다. 파단 지점에서 넥킹현상이 발생하고 넥킹구간에서 철근의 단면감소가 발생하였음을 확인할 수 있다. Fig. 6 (a), (b)에서는 파단시의 충격으로 부착된 타겟들이 다소 탈락되었다. 시험체 마다 넥킹구간은 불규칙한 위치에서 발생하며 파단시의 신장량이 다소 차이가 있다. 그리고 넥킹구간의 길이는 철근의 직경에 다소 비례하게 증가하는 것을 그림을 통해서 가늠해볼 수 있다.

#### 3.2.2 응력-변형률 관계

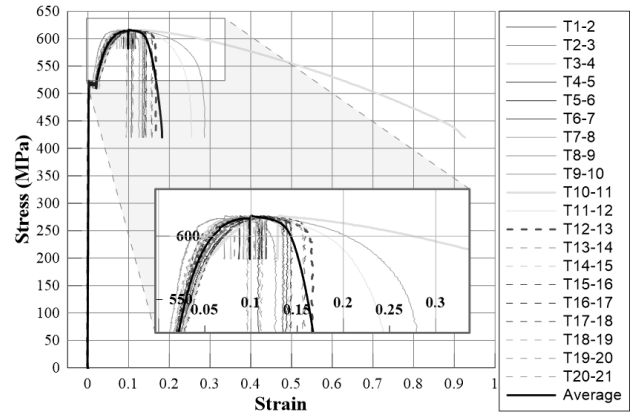
Fig. 7은 D10, D19, D29, D35 철근의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 시험체의 응력은 계측된 하중과 철근의 공칭단면적을 이용하여 산출하였다. 각 시험체의 응력-변형률 곡선에서 평균값(average)은 전체 타겟 구간의 평균값을 의미하는 것으로 산술적으로 표점구간 내의 평균 변형률을 의미하게 된다. 이는 표점거리의 신장량을 측정하여 변형률을 산출하는 기존 방식과 동일한 평가 방식이다.

응력-변형률 곡선을 살펴보면, 먼저 넥킹이 발생하는 구간에서 변형률이 다른 구간에 비해 매우 크게 발생하고 있다는 것을 알 수 있다. D19 철근에서 넥킹부의 변형률이 가장 크게 계측되었는데 파단직전에 약 0.918의 변형률이 발생함을 알 수 있었다. 이는 파단 시 표점구간 평균변형률의 약 5배에 해당하는 값으로 철근에 발생한 전체 변형률 중 약 25% 정도에 해당하는 변형이 넥킹구간에서 발생하고 있음을 보여준다. 다른 철근들의 경우에는 약 15~20% 정도의 변형(변형률 0.4~0.6)이 넥킹구간에서 발생하고 있는 것을 알 수 있었다.

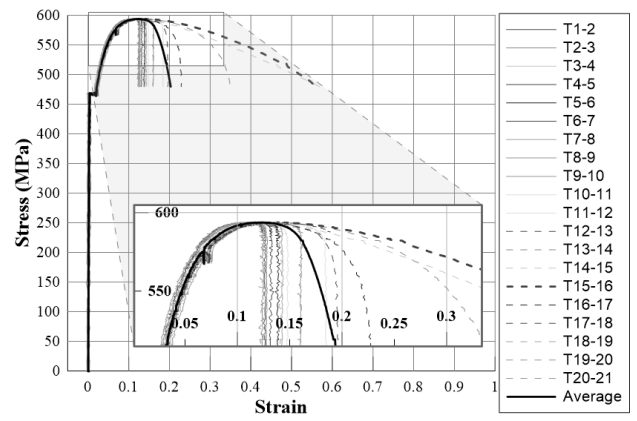
철근의 일부구간에 넥킹현상이 발생한 이후에는 넥킹구간을 제외한 다른 구간에서의 변형률 증가는 미소함을 확인하였다. 따라서 넥킹이 발생하기 이전까지는 철근의 중방향으로 비교적 균등한 변형률 분포를 나타내고, 하중이 증가함에 따라 각 구간별 변형률이 비례하게 증가함을 알 수 있



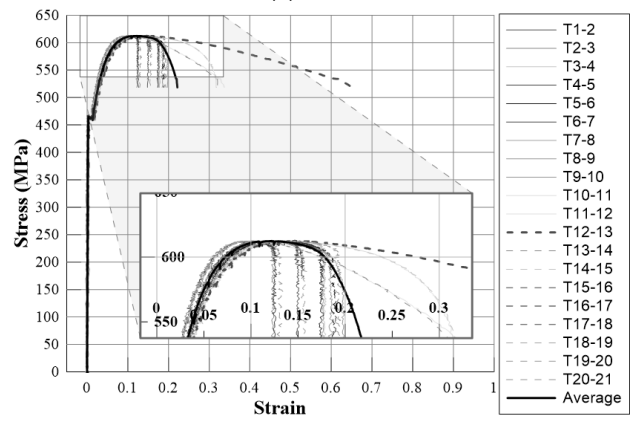
(a) D10-2



(b) D19-1



(c) D29-1



(d) D35-2

Fig. 7 Stress-strain relationship of the rebar measured with the image processing method

었다. 그러나 넥킹이 발생한 이후에는 넥킹구간 및 인접구간을 제외한 영역에서는 변형률의 증가는 더 이상 나타나지 않았다. 이와 같은 현상은 모든 철근 시편에서 동일하게 나타났다. 따라서 1축 인장상태의 철근에서 철근의 거동이 극한상태에 도달하게 되면 재료적 결함이 가장 큰 곳 혹은 가장 취약한 부분에서 넥킹이 발생하고, 철근은 더 큰 하중에 저항할 수 없으며, 넥킹구간에서 대부분의 변형이 일어나게 된다. 그러므로 1축 인장 상태에서 철근의 넥킹 이후에는 넥킹구간을 제외한 구간에서는 추가적인 하중 분담이 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 따라서 향후 철근의 한계상태 변형률을 정의함에 있어 1축 인장 시험에서 얻어진 구간별 변형률을 활용한다면 좀 더 합리적인 평가가 가능할 것으로 판단된다.

### 3.2.3 철근의 종방향 변형률 분포

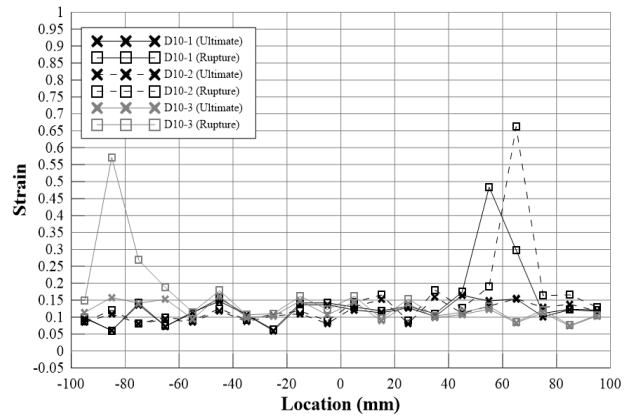
철근의 응력상태에 따른 종방향 변형률 분포 및 이에 대한 변화를 비교하기 위하여 본 연구에서 수행한 철근의 극한상태와 파단시의 종방향 변형률 분포를 비교하였다. Fig. 8은 그에 대한 결과물로서 응력단계는 극한강도와 파단시의 강도를 기준으로 도시하였다.

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 차이를 통하여, 넥킹구간의 길이는 직경에 비례하다는 것을 가늠해볼 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.

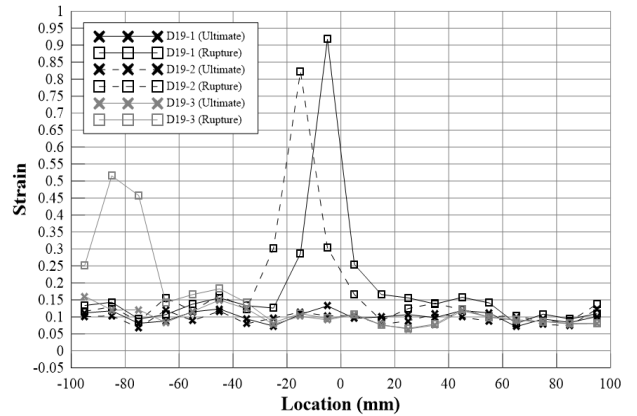
### 3.2.4 넥킹구간의 분석

본 연구에서 수행한 인장시험 결과를 이용하여 철근의 직경과 넥킹구간 길이의 상관관계를 분석하였다. 넥킹구간 길이의 측정은 자 또는 버니어캘리퍼스를 이용하여 물리적으로 측정이 가능하나, 파단된 철근의 표면 상태 및 마디의 영향으로 넥킹구간의 시점과 종점을 객관적으로 규정하기에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 철근의 파단 시점에서의 변형률 분포를 이용하여 철근별 넥킹구간의 길이를 평가하였다. 변형률 분포는 동일한 하중에 대해서 각 지점의 단면변화를 반영한 결과물이다. 그러므로 물리적인 측정에 비해 좀 더 객관적으로 넥킹구간의 길이를 산정할 수 있다.

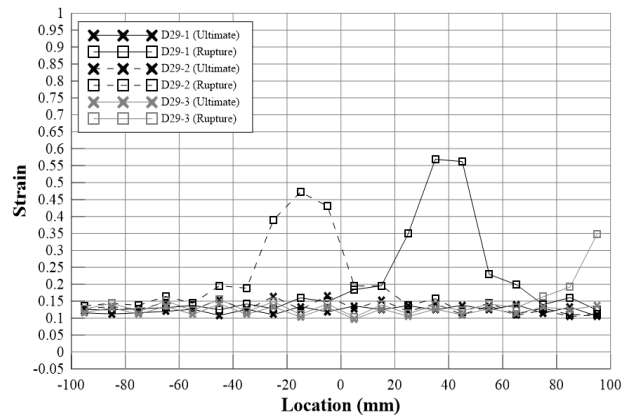
변형률 분포를 이용하여 산출한 넥킹구간은 파단 시 변형률분포에서 각 구간별 증가비를 그래프로 도시한 후 증가비가 작은 구간과 증가비가 큰 구간을 구분하고, 각 구간의 추세선의 교차점을 이용하여 산출하였다. 본 연구에서는 변형률 분포 그래프에서 각 구간별 추세선을 산출하고 추세선의 변



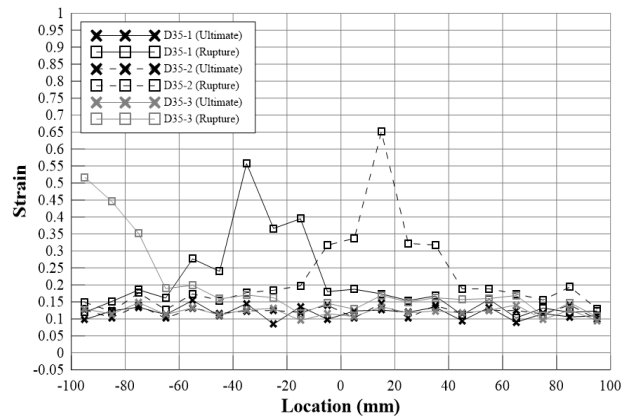
(a) D10-1, 2, 3



(b) D19-1, 2, 3



(c) D29-1, 2, 3



(d) D35-1, 2, 3

Fig. 8 Strain distribution of the rebar measured with the image processing method

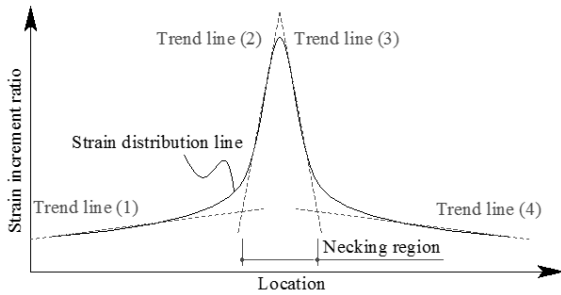


Fig. 9 Definition of necking region

Table 3 Details of specimens

Specimen (Nominal diameter, mm)	Necking-region length ( $L_{neck}$ , mm)	Necking-region factor ( $N_{neck}$ ) <sup>1)</sup>
10 (9.5)	1	29.360
	2	20.684
	3	29.055
19 (19.1)	1	36.822
	2	43.584
	3	35.862
29 (28.6)	1	43.946
	2	42.448
	3	19.735
35 (34.9)	1	57.641
	2	58.264
	3	33.048

1)  $N_{neck} = L_{neck}/D_{norm}$

화가 생긴 구간을 넥킹구간으로 정의하였다. Fig. 9는 본 연구에서 이용한 추세구간의 구분을 정의한 그림으로 각 추세선의 교차점을 넥킹구간으로 정의하였음을 보여준다.

평가된 넥킹구간은 Table 3에 정의하였다. D29-3과 D35-3은 넥킹구간 중 일부만이 계측이 되어 넥킹구간 분석에서 제외하였다. 이를 제외한 나머지 시편에 대해서 분석을 수행한 결과, 넥킹구간의 길이는 식 (1)과 같은 관계를 갖는 것으로 나타났다.

$$L_{neck} = 6.9 \cdot D_{norm}^{0.58} \quad (1)$$

여기서,  $L_{neck}$  은 넥킹구간의 길이를 나타내며,  $D_{norm}$  은 철근의 공칭직경을 의미한다. Fig. 10은 실험값과 식 (1)의 예측값을 비교한 것으로 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 향후 좀 더 많은 표본을 이용한 정확한 평가가 요구되나, 본 연구에서 얻어진 철근 직경과 넥킹구간 길이의 관계를 이용하여 콘크리트에 매립된 철근의 넥킹에 의한 부착강도 저하 및 균열양상 분석의 기초연구자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

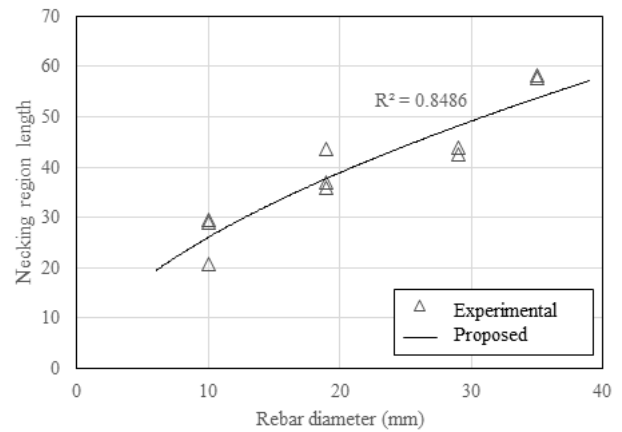
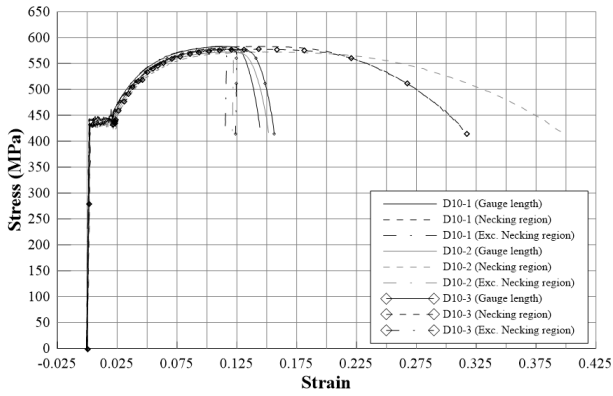


Fig. 10 Relationship between the necking-region length and rebar diameter

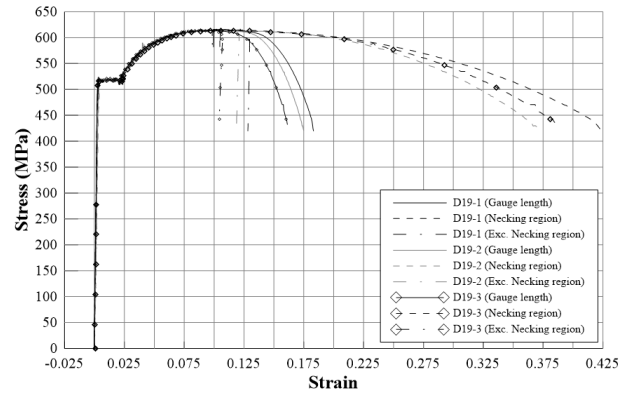
Fig. 10에 도시한 바와 같이 철근의 넥킹구간은 철근의 직경에 비례하여 증가하는데, 철근의 직경이 커질수록 표점구간 내에서 더 많은 구간이 넥킹의 영향을 받게 된다. D10-2 철근의 경우 최대하중에서의 변형률 분포와 파단시의 변형률 분포간의 차이는 넥킹구간에서만 명확하게 차이가 나타나고 나머지 구간은 유사한 크기의 변형률 분포를 보인다. 그러나 D35-2 철근의 경우 대부분의 구간에서 변형률이 증가하여 표점구간의 대부분이 넥킹의 영향을 받고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 철근의 한계상태 변형률 및 파단변형률을 평가할 때 넥킹부의 영향을 줄이기 위해서는 철근 직경과 넥킹구간의 상관관계를 평가한 후 넥킹의 영향을 최소화할 수 있는 표점거리를 산출해야 할 것으로 판단된다. 현재 철근 인장시험법은 크게 ISO 15630과 ASTM A 370으로 구분되는데, ISO의 경우 표점거리는 직경의 5배로 정의하고 있으며, ASTM은 직경에 상관없이 200 mm를 적용하도록 되어 있다. 그러나 D35 철근의 변형률 분포를 통해서 확인할 수 있듯이, 두 시험기준 모두 D35 철근에서는 표점구간내에서 넥킹의 영향이 매우 클 것임을 알 수 있다. 따라서 D35 철근의 경우 표점구간 내에서 넥킹구간의 영향을 줄이기 위해서는 ISO (175 mm)와 ASTM (200 mm) 기준 보다 더 큰 표점거리 값을 취해야 할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구내용에서 알 수 있는 바와 같이 표점거리와 넥킹구간의 분포는 최종 평가되는 철근의 한계상태변형률 및 파단변형률에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 추후 많은 연구를 통하여 객관성 있는 기준이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

### 3.2.5 넥킹구간을 제외한 평균변형률의 평가

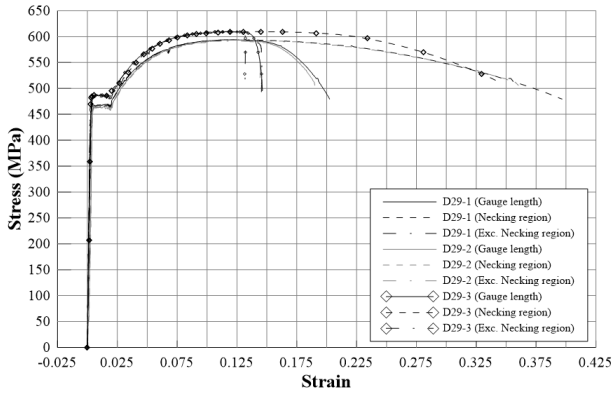
본 연구에서 얻어진 결과를 바탕으로 철근의 1축 인장상태에서 넥킹구간의 변형은 철근의 직경에 비례하게 증감한다는 것을 알 수 있었다. 넥킹 발생시 넥킹구간의 변형률은 다른 구간에 비해서 매우 높은 변형률을 나타내는데, 표점거리를 이용한 평가 방법은 넥킹구간이 표점구간 내에서 위치하는 곳이 어딘가에 따라 넥킹구간이 차지하는 비중이 달라지기 때문에 최종 평가된 변형률 결과 역시 달라질 수 있



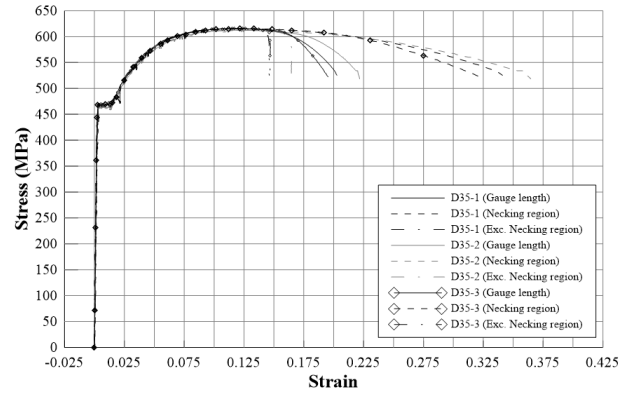
(a) D10-1, 2, 3



(b) D19-1, 2, 3



(c) D29-1, 2, 3

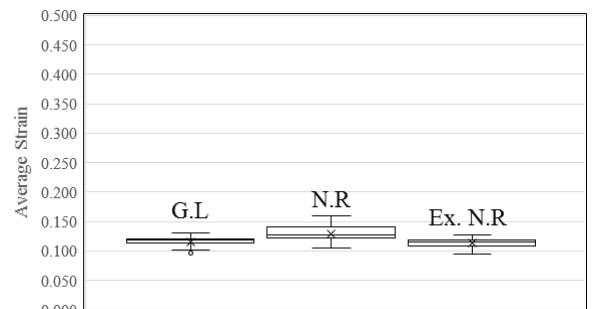


(d) D35-1, 2, 3

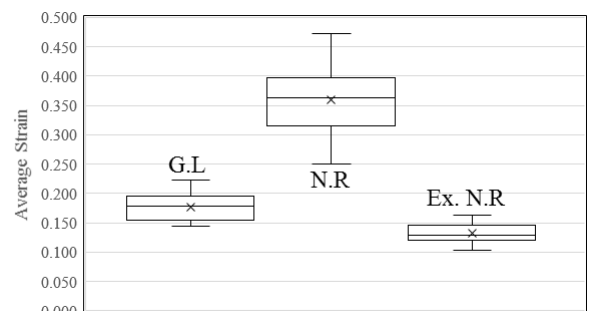
Fig. 11 Stress-strain relationship depending on the evaluation method

다. 철근은 다른 구조용 재료보다 비교적 균일한 재료이나 이상적으로 완전하게 균일한 재료가 아니기 때문에 각 구간마다 미소한 재료적 불균질함 혹은 기하학적 불균등성을 나타낼 수 있다. 이에 따라 철근의 넥킹 발생위치는 확률적으로 매우 큰 불확실성을 가진다. 이러한 불확실성에 기인하여 최종 평가된 변형률은 동일한 강종과 직경의 철근이더라도 결과 값의 분산이 크게 나타난다. 일반적으로 알려진 사실과 같이 본 연구에서 얻은 시험결과에서도 철근의 1축 인장상태에서 최대하중 도달 시 최소 변형률을 나타내는 구간은 철근의 임의의 구간에서 넥킹이 발생한 후에도 변형률의 증가가 매우 미소하였다. 이는 한계상태변형률 도달 시까지 철근의 전단면에 걸쳐서 비교적 균등하게 변형률이 발생하며, 넥킹 발생 이후 넥킹구간 이외의 단면에서는 한계상태 변형률 이상의 추가적인 변형은 매우 제한적임을 보여준다. 따라서 과단 변형률의 분산은 넥킹구간의 불확실성에서 기인함을 추론해볼 수 있다. 따라서 철근의 변형률 평가 시에 넥킹구간을 제외하고 평균변형률을 산출한다면 넥킹발생의 불확실성에서 기인한 시험오차를 최소화할 수 있다는 것을 생각해볼 수 있다.

따라서 본 절에서는 넥킹구간에 의한 철근 변형률의 불확실성을 비교하기 위하여 세 가지 방법을 사용한 철근의 응력-변형률 곡선을 Fig. 11에 도시하고 이에 대한 한계상태변형률과 과단변형률을 비교하였다. 평가방법은 1)기존의 표점거리내의 평균변형률을 산출하는 방법(GL)과 2)넥킹 구간의 평균변형률을 산출하는 방법(NR), 그리고 3)전체 표점거



(a) Limit state strain



(b) Rupture strain

Fig. 12 Variation of average strain results depending on the evaluation method

리내에서 넥킹 구간을 제외한 구간의 변형률을 산출하는 방법(Ex.NR)을 적용하였다. Table 4는 평가결과를 정량적으로 비교한 것이다. 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 평가방

**Table 4** Results depending on the evaluation method

Specimen		Ultimate strength (MPa)	Limit state strain	Rupture strength (MPa)	Rupture strain
D1 0-1	G.L <sup>1)</sup>	583.1	0.117	426.6	0.145
	N.R <sup>2)</sup>		0.146		0.313
	Ex. N.R <sup>3)</sup>		0.112		0.116
D1 0-2	G.L <sup>1)</sup>	572.3	0.119	416.7	0.149
	N.R <sup>2)</sup>		0.159		0.397
	Ex. N.R <sup>3)</sup>		0.115		0.121
D1 0-3	G.L <sup>1)</sup>	577.5	0.118	414.3	0.156
	N.R <sup>2)</sup>		0.141		0.317
	Ex. N.R <sup>3)</sup>		0.114		0.124
D1 9-1	G.L <sup>1)</sup>	616.0	0.101	424.4	0.182
	N.R <sup>2)</sup>		0.107		0.422
	Ex. N.R <sup>3)</sup>		0.100		0.127
D1 9-2	G.L <sup>1)</sup>	614.3	0.096	420.8	0.174
	N.R <sup>2)</sup>		0.105		0.472
	Ex. N.R <sup>3)</sup>		0.095		0.120
D1 9-3	G.L <sup>1)</sup>	614.6	0.102	432.4	0.162
	N.R <sup>2)</sup>		0.121		0.386
	Ex. N.R <sup>3)</sup>		0.097		0.104
D2 9-1	G.L <sup>1)</sup>	593.7	0.123	479.5	0.201
	N.R <sup>2)</sup>		0.130		0.397
	Ex. N.R <sup>3)</sup>		0.121		0.145
D2 9-2	G.L <sup>1)</sup>	593.1	0.131	505.9	0.190
	N.R <sup>2)</sup>		0.144		0.360
	Ex. N.R <sup>3)</sup>		0.127		0.144
D2 9-3	G.L <sup>1)</sup>	609.6	0.121	495.4	0.146
	N.R <sup>2)</sup>		0.131		0.250
	Ex. N.R <sup>3)</sup>		0.119		0.131
D3 5-1	G.L <sup>1)</sup>	615.5	0.117	525.4	0.203
	N.R <sup>2)</sup>		0.122		0.341
	Ex. N.R <sup>3)</sup>		0.115		0.146
D3 5-2	G.L <sup>1)</sup>	614.5	0.122	518.4	0.223
	N.R <sup>2)</sup>		0.125		0.365
	Ex. N.R <sup>3)</sup>		0.121		0.164
D3 5-3	G.L <sup>1)</sup>	615.5	0.120	522.3	0.195
	N.R <sup>2)</sup>		0.125		0.303
	Ex. N.R <sup>3)</sup>		0.118		0.147

- 1) G.L : Average strain over gauge length
- 2) N.R : Average strain over necking region
- 3) Ex. N.R : Average strain over gauge length excluding necking region

**Table 5** Variation results depending on the evaluation method

Category		G.L <sup>1)</sup>	N.R <sup>2)</sup>	Ex. N.R <sup>3)</sup>
Limit state strain	Min	0.096	0.105	0.095
	Q1	0.113	0.122	0.109
	Average	0.116	0.130	0.113
	Q3	0.121	0.142	0.120
	Max	0.131	0.159	0.127
Rupture strain	Min	0.145	0.250	0.104
	Q1	0.154	0.316	0.121
	Average	0.177	0.360	0.132
	Q3	0.197	0.397	0.145
	Max	0.223	0.472	0.164

- 1) G.L : Average strain over gauge length
- 2) N.R : Average strain over necking region
- 3) Ex. N.R : Average strain over gauge length excluding necking region

법에 따라 동일한 철근에서의 응력-변형률 곡선이 상이하게 평가됨을 알 수 있다. GL방법과 NR방법의 경우에는 극한상태 이후부터 파단시까지 넥킹구간에서 발생한 변형률의 크기에 따라 극한 이후의 거동이 다르게 분석되었다. Ex.NR 방법에서는 극한상태 이후 발생한 넥킹구간에서의 변형률을 결과에서 제외하였기 때문에, 극한상태에서 응력의 감소만이 발생하고, 변형률의 증가는 미소하게 평가되었다.

Fig. 12와 Table 5는 본 연구에서 시험한 전체 철근의 한계상태변형률과 파단변형률에 대해서 평가방법에 따라 평균값과 최댓값, 최솟값, 그리고 1 사분위와 3 사분위 값을 표시한 것이다. 이를 통하여 동일 강종의 철근에 대해서 평가방법에 따른 차이를 분석하였다. 앞서 설명한 바와 같이 한계상태 변형률의 경우에는 모든 평가방법이 분산이 적게 나타났다. 파단 변형률의 경우, 넥킹구간만을 기준으로 평가할 경우(NR) 결과의 분산이 매우 커지는 것을 확인할 수 있고, 기존 표점구간 내 평균변형률의 경우(GL)과 표점구간에서 넥킹구간을 제외하고 평가한 경우(Ex.NR)에는 넥킹구간을 대상으로 하는 것보다 시험결과 분산이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었고, 넥킹구간의 영향을 배제함에 따라 Ex.NR의 경우 신뢰도가 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 기존 시험방법에서 재시험으로 규정하는 넥킹구간 위치가 표점구간의 바깥쪽에 위치한 경우에 대해서도 표점구간 내에 일부 존재하는 넥킹구간을 제외하는 것이 가능하며, 넥킹구간 발생 위치의 불확실성에 따른 실험의 불확실성을 해소할 수 있었다. 따라서 본 연구를 통하여 철근의 1축 인장시험에서 합리적인 평균변형률 평가는 표점구간에서 넥킹구간의 변형률을 제외한 평균변형률을 산출하는 것이 바람직하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 평가방법에 따른 차이를 해소하기 위한 기초자료를 제시하기 위하여, SD400 강종의 D10, D19, D29,



D35 철근의 1축 인장 시험을 수행하고 이에 대한 변형률 분포 및 넥킹구간에 대한 평가를 수행하였다. 기존의 계측방법이 갖는 제한사항 때문에 본 연구에서는 비교적 계측범위의 제한이 없고 계측구간의 구분이 수월한 이미지 프로세싱 방법을 이용하여 넥킹구간의 변형률과 철근의 구간별 변형률을 상세하게 평가하였다. 마지막으로 본 연구를 통하여 얻어진 결과를 이용하여, 철근의 1축인장시험에서 평균변형률을 합리적으로 정의하기 위한 목적으로 최소 변형률 구간에서의 응력-변형률 관계를 바탕으로 변형률을 평가하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 철근의 극한거동 시 발생하는 넥킹구간에 대해서 평가한 결과, 넥킹이 발생하는 구간의 길이에 대하여 철근의 직경과의 연관성을 분석할 수 있었다. 평가결과에 따르면 넥킹구간의 길이는 식 (1)과 같음을 확인할 수 있었다. 향후 더 많은 표본을 이용한 정확한 평가가 요구되나, 본 연구에서 얻어진 철근 직경과 넥킹구간 길이의 관계를 이용하여 콘크리트에 매립된 철근의 넥킹에 의한 부착강도의 저하 및 균열양상 분석의 기초연구자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 본 연구를 통해서 철근 표점구간 내 평균변형률 평가시 넥킹구간의 변형률을 제외 한 후 평가하는 것이 결과의 분산이 가장 작게 나타남을 알 수 있었다. 이는 이미지 프로세싱 방법을 이용하여 철근의 변형률을 측정함으로써 비교적 변형률의 편차가 큰 넥킹구간의 결과를 제외하는 것이 가능하여, 실험결과의 불확실성을 해소되기 때문인 것으로 판단된다.

추후 더 많은 표본을 대상으로 한 인장시험을 통하여 철근 직경과 넥킹구간 길이의 상관관계에 대한 신뢰도 향상을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 철근의 1축 인장시험 방법 및 한계상태변형률 평가방법에 따른 평가결과의 차이를 해소할 수 있는 다양한 평가방법론에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2014R1A1A2058140, 2014R1A1A2058484)

## References

1. ISO 2394:2015, *General Principles on Reliability for Structures*, International Standard Organization 2015.
2. Park, S. J., Kang, T. S., and Moon, D. Y., "A Study on the Flexural Minimum Reinforcement for Prevention of Brittle

- Failure Specified in KCI and EN Codes", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 26, No. 2, 2014, pp. 211-218.
3. Lee, J. H., Kim, D. H., and Choi, J. H., "Evaluation of Minimum Extensibility Standard Requirements for Steel Reinforcement", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 5, 2011, pp. 559-567.
4. ISO 15630-1:2010, *Steel for the Reinforcement and Prestressing of Concrete - Test Methods - Part 1: Reinforcing Bars, Wire Rod and Wire*, International Standard Organization, 2014.
5. ASTM A 370-14, *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, ASTM International 2014.
6. KS B 0802:2013, *Method of Tensile Test for Metallic Materials*, Korean Agency for Technology and Standards 2013.
7. JIS Z 2241:2011, *Metallic Materials - Tensile Testing - Method of Test at Room Temperature*, Japanese Industrial Standard 2011.
8. Wahbeh, A., Caffrey, J. P., and Masri, S. F., "A Vision-based Approach for the Direct Measurement of Displacements in Vibrating Systems", *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, No. 5, 2003, pp. 785-794.
9. Lee, J. J., and Shinozuka, M., "Real-time Displacement Measurement of a Flexible Bridge Using Digital Image Processing techniques", *Experimental Mechanics*, Vol. 46, No. 1, 2006, pp. 105-114.
10. Ji, Y. F., Chang, C. C., "Nontarget Image-based Technique for Small Cable Vibration Measurement", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 13, No. 1, 2008, pp. 34-42.
11. Kwon, Y. G., Han, S. H., and Hong, K. N., "Estimation of Local Strain Distribution of Shear-Compressive Failure Type Beam Using Digital Image Processing Technology", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 2, 2009, pp. 121-127.
12. Barranger, Y., Doumalin, P., Dupre, J. C., and Germaneau, A., "Strain Measurement by Digital Image Correlation: Influence of Two Types of Speckle Patterns Made from Rigid or Deformable marks", *Strain*, Vol. 48, 2012, pp. 357-365.
13. Kim, S. D., Jung, C. Y., Woo, T. R., and Cheung, J. H., "Application of Image Processing Method to Evaluate Ultimate Strain of Rebar", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 20, No. 3, 2016, pp. 111-121.
14. KS D 3504:2016, *Steel Bars for Concrete Reinforcement*, Korean Agency for Technology and Standards 2016.

---

**요약** 본 연구에서는 시험기준에 따른 차이를 해소하기 위한 기초자료를 제시하기 위하여, 철근의 1축 인장 시험을 수행하고, 이에 대한 변형률 분포 및 넥킹구간에 대한 평가를 수행하였다. 기존의 계측방법이 갖는 제약사항 때문에 본 연구에서는 비교적 계측범위의 제한이 없고, 계측 구간의 구분이 수월한 이미지 프로세싱방법을 이용하여 넥킹구간의 변형률과 철근의 구간별 변형률을 상세하게 평가하였다. 마지막으로 본 연구를 통하여 얻어진 결과를 이용하여, 철근의 1축인장시험에서 한계상태변형률을 합리적으로 정의하기 위한 평가방법을 제시하고자 하였다. 철근의 극한거동 시 발생하는 넥킹구간에 대해서 평가한 결과, 넥킹구간의 길이에 대하여 철근의 직경과의 연관성을 분석할 수 있었으며, 이에 대한 상관식을 도출하였다. 본 연구를 통해서 철근의 표점구간 내 평균변형률 평가 시 넥킹구간의 변형률을 제외한 후 평가하는 것이 결과의 신뢰도가 가장 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한 이미지 프로세싱 방법을 이용하여 철근의 변형률을 측정함으로써 기존 시험방법에서 재시험으로 규정하는 넥킹구간 위치가 표점구간의 바깥쪽에 위치한 경우에 대해서도 표점구간 내에 일부 존재하는 넥킹구간을 제외하는 것이 가능하며, 넥킹구간 발생 위치의 불확실성에 따른 실험의 불확실성을 해소할 수 있었다.

**핵심용어** : 변형률, 철근, 변형률 분포, 넥킹, 영상분석