

## 철근의 파단 연신율 평가와 표점거리 표준 제안

## Evaluation of Fracture Elongation of Steel Reinforcement and Proposal for Gage Length Standard

표세림<sup>1</sup> · 이승우<sup>2</sup> · 이은호<sup>3</sup> · 이재훈<sup>4\*</sup><sup>1</sup>코비코리아 엔지니어, <sup>2</sup>디엠엔지니어링 엔지니어, <sup>3</sup>동명기술공단 대리, <sup>4</sup>영남대학교 건설시스템공학과 교수Se-Rim Pyo<sup>1</sup>, Seung-Woo Lee<sup>2</sup>, Eun-Ho Lee<sup>3</sup>, and Jae-Hoon Lee<sup>4\*</sup><sup>1</sup>Engineer, Department of Bridge Engineering, COWI Korea, Seongnam 13595, Korea<sup>2</sup>Engineer, Department of Bridge Engineering, DM Engineering, Seoul 05288, Korea<sup>3</sup>Assistant Manager, Department of Structural Engineering, Dong Myeong Engineering Consultants, Hwaseong 02589, Korea<sup>4</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 35841, Korea

\*Corresponding author : Jae-Hoon Lee, JHL79@ynu.ac.kr

Received : November 30, 2023

Revised : December 1, 2023

Accepted : December 1, 2023

## A B S T R A C T

Tensile tests were carried out with steel reinforcing bars produced by the requirement of the ASTM standards, and test results of 23 test specimens were obtained that provided fracture elongation determined by KS, ISO, and ASTM standards. Strictness evaluation of fracture elongation was performed for each standard by analyzing a total data of 130 specimens, combining 107 specimens performed by previous researchers for reinforcing bars produced by the requirement of KS standards. The fracture elongation of general structural rebar was similarly strict in KS and ISO standards, and ASTM standards were considered less stringent. Although KS, ISO, and ASTM standards showed slightly different strictness in the fracture elongation requirement for seismic reinforcement, there was no significant difference. Since the necking length showed to be proportional to the reinforcing bar diameter, it might be reasonable to define the gauge length as a multiple of the reinforcing bar diameter. Therefore, it is believed that KS standards need to define a single multiple value of reinforcing bar diameter for the gauge length, and it may be an alternative to define the same regulations for minimum fracture elongation as ISO standards.

**Keywords** : steel reinforcing bar, fracture elongation, gauge length, necking distance, KS, ISO, ASTM standards

## 1. 서론

철근의 역학적 성능은 연성능력을 나타내는 연신율과 강도성능을 나타내는 항복강도와 인장강도로 표현되므로, 철근에 대한 모든 표준들은 굽힘성능 조건과 함께 항복강도, 인장강도, 연신율의 요구조건을 규정하고 있다. 철근의 연신율은 두 가지로, 철근이 끊어질 때의 변형률인 파단연신율(fracture elongation)과 최대 강도인 인장강도가 발현될 때의 변형률인 균일연신율(uniform elongation)로 나타낸다. 따라서 철근의 최소연신율 조건은 각 나라의 표준에 따라 파단연신율 또는 균일연신율로 규정하는 것이 일반적이지만, 국제표준인 ISO 6935-2(2007)는 파단연신율과 균일연신율 모두에 대한 최소 조건을 규정하고 있다. 한국의 철근 표준 KS D 3504(2021)와 미국의 철근표준 ASTM A615(2022a)와 ASTM A706(2022b)은 파단연신율로 최소연신율 조건을 규정하고 있다. 그러나 한국과 미국의 철근표준은 최소연신율을 각기 다른 값으로 규정하고 있는데, 이것은 파단연신율을 측정할 때의 표점거리가 다르게 규정되어 있기 때문이다. 따라서 철근 표준의 최소연신율 조건만으로는 어떤 표준이 더 엄격한 연성능력을 요구하는지 알 수 없다. 한편 KS D 3504는 KS B 0801(1981)의 규정에 따라 2호 시험편(D22 이하 철근)은 철근 지름의 8배로,



3호 시험편(D25이상 철근)은 철근 지름의 4배로 표점거리를 규정하고 있어서, 철근 지름에 따라 다른 표점거리를 적용하는 것이 합리적인지에 대한 논란이 있어 왔다. 또 ASTM A615와 ASTM A706은 ASTM A370(2023)의 규정에 따라 표점거리를 8in. (203.2 mm)로 규정하고 있어서, 철근지름과 무관하게 일정한 길이의 표점거리를 적용하는 것이 합리적인지에 대한 의문이 있어 왔다.

또 한편 한국의 원전설계기준인 KEPIC Code SNB(KEA 2010)와 SNC(KEA 2015)는 ACI 359 Code(ASME Section III division 2, 2007)와 ACI 349 Code(2013)와 동일하게, 철근의 강도 요구조건은 일반구조용 철근에 대한 표준인 ASTM A615에 따르고 연신율은 용접용과 내진용 철근에 대한 표준인 ASTM A706에 따르도록 규정하고 있다. 따라서 KEPIC Code의 관련 규정을 개정하지 않은 상태에서 KS D 3504에 부합되도록 생산된 철근을 원전에 적용하려면 ASTM A706의 연신율 조건을 만족하는지 확인하여야 한다.

이 연구에서는 ASTM A615의 항복강도와 ASTM A706의 최소연신율 표준에 만족하도록 생산된 45개의 철근으로 인장시험을 실시하였고, 그 중 KS, ISO, ASTM 표준에 따른 파단연신율을 모두 측정할 수 있게 파단된 23개의 시험결과를 도출하였다. 이 시험결과와 선행연구자가 KS D 3504에 준하여 생산된 철근을 대상으로 수행한 시험결과 107개를 합하여, 총 130개의 시험결과에 대한 분석으로 표준별 최소연신율 조건의 엄격성을 비교하였으며 합리적이라고 판단되는 파단연신율 측정용 표점거리를 제안하였다.

## 2. 철근의 파단연신율 표준

### 2.1 철근의 연신율

Fig. 1은 철근의 인장응력-변형률 곡선과 두 가지 연신율을 나타낸다. 균일연신율은 Fig. 1의 ③으로 나타낸 변형률  $\epsilon_u$ 로 인장강도가 발현될 때의 변형률을 의미한다. 변형률이  $\epsilon_u$ 를 초과하면 Fig. 1의 ④의 그림으로 나타낸 바와 같이 철근의 일부에 단면적이 줄어드는 네킹(necking) 현상이 발생한다. 변형률이 증가하면 네킹이 진행되어 변형률이 Fig. 1의 ⑤로 나타낸 변형률  $\epsilon_{ult}$ 에 도달하면 네킹이 발생한 위치에서 파단되는데, 이때의 변형률이 파단연신율이다.

Table 1은 항복강도 400 MPa 급 이형철근에 대한 한국 표준 KS, 국제 표준 ISO, 미국 표준 ASTM의 규격을 나타낸다. KS 표준은 D22 이하 철근의 경우 철근 지름의 8배, D25이상 철근의 경우 철근 지름의 4배를 표점거리로 하여 시험한 결과가 최소 파단연신율 이상하도록 규정하고 있다. 이때 KS 표준에서는 각각 16 %와 18 %인 기본 최소 파단연신율(basic minimum fracture

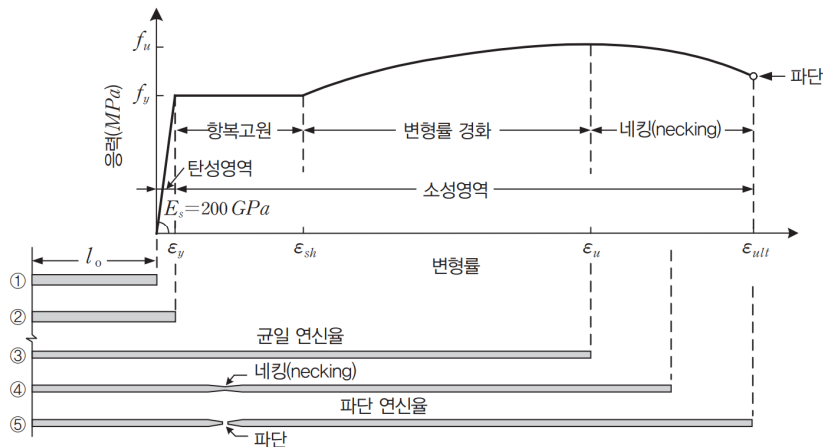


Fig. 1. Stress-strain curve of steel reinforcement and definitions of elongation (Lee 2023)

**Table 1.** Minimum elongation and gauge length for 400 MPa level reinforcement in the selected standards

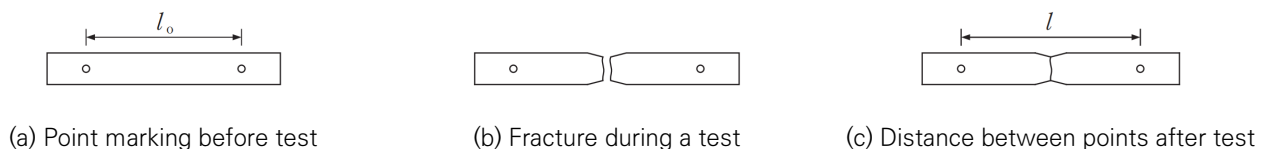
Standard	Classification	Symbol/Grade	Basic minimum fracture elongation [%]		Gage length	Minimum yield strength [MPa]
KS D 3504	Structural	SD400	Less than or equal to D22	12~16	8d <sub>b</sub>	400
	Weldable	SD400W				
	Seismic	SD400S	Larger than or equal to D25	14~18	4d <sub>b</sub>	
ISO 6935-2	Ductility class A	B400A-R/B400AWR	14		5d <sub>b</sub>	
	Ductility class B	B400B-R/B400BWR				
	Ductility class C	B400C-R/B400CWR				
	Ductility class D	B400DWR	13~17			
ASTM	A615	Grade 60	7~9		8in. (203 mm)	420
	A706	Grade 60	10~14			

elongation)을 기본으로 하며, D32를 초과하는 철근의 경우에는 호칭명이 3(mm) 증가할 때마다 연신율 최솟값을 4% 이내의 범위에서 2%씩 감소시킨다. ISO 표준은 철근 지름의 5배를 표점거리로 하여 시험한 결과가 최소 파단연신율 이상하도록 규정하고 있다. 이때 ISO 표준에서는 D 등급 철근의 경우 17%인 최소 파단연신율을 기본으로 하며, D32 이상의 철근일 때는 호칭명이 3(mm) 증가할 때마다 연신율 최솟값을 4% 이내의 범위에서 2%씩 감소시킨다. ASTM 표준은 철근지름과 무관하게 일정한 길이인 8in.(203 mm)를 표점거리로 하여 시험한 결과가 최소 파단연신율 이상하도록 규정하고 있다. 이때 최소 파단연신율은 ASTM A615 철근의 경우 지름이 10~19 mm일 때 9%, 지름이 22 mm와 25 mm일 때 8%, 지름이 29~64 mm일 때 7%이며, ASTM A706 철근의 경우 지름이 10~20 mm일 때 14%, 지름이 25~36 mm일 때 12%, 지름이 40 mm 이상일 때 10%이다. 항복 강도 400 MPa 급 이외의 이형철근에 대한 표준 규격들은 다른 문헌(Lee 2023)에 요약 정리되어 있다.

### 2.2 파단연신율 측정법

파단연신율 측정 방법으로는 근래에 들어 영상계측장비를 활용하는 방법이 제안되기도 하지만, 한국 표준 KS B 0802 금속 재료 인장 시험 방법(2001)은 표점 사이의 거리를 측정된 값으로 계산하여 결정하도록 규정하고 있다. 즉, Fig. 2의 (a)와 같이 KS B 0801 금속재료 인장 시험편(1981)의 규정에 따른 거리  $l_0$ 를 갖도록 두개의 표점을 표시한 후 인장시험을 수행하여, Fig. 2의 (b)와 같이 두 표점 사이에서 파단이 발생하면 Fig. 2의 (c)와 같이 파단면을 이어 붙여 표점 사이의 거리  $l$ 을 측정된 후 식 (1)과 같이 퍼센트 단위의 파단연신율  $\delta$ 를 구한다. 만일 파단된 위치가 두개의 표점 사이가 아니면 인장시험을 다시 실시한다. 한편 이와 같이 방법 대신 연신율계(extensometer)를 이용할 때는 표점 거리가 시험편(specimen)의 표점 거리와 같고, 또한 표점 거리의  $\pm 0.5\%$ 에 상당하는 정밀도로 연신율을 측정할 수 있는 연신률계를 사용하여야 한다.

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 \tag{1}$$



**Fig. 2.** Measurement of fracture elongation (Lee 2023)

### 3. 철근 인장시험

#### 3.1 시험 변수

ASTM A615의 항복강도와 ASTM A706의 최소연신율 표준에 만족하도록 생산된 45개의 철근을 대상으로 인장시험을 실시하였다. 시험편의 변수는 철근의 설계기준항복강도와 지름으로, Table 2의 두 번째 열에 나타난 바와 같이 지름 16~57 mm(공칭 지름으로는 15.9~57.3 mm) 사이에서 Grade 60은 5가지, Grade 80은 4가지 크기의 철근을 대상으로 하였다. 시험을 수행한 각 철근의 지름은 Table 4에 나타나 있다.

#### 3.2 시험편 제작 및 시험 방법

철근 시험편은 KS B 0801과 KS B 0802의 규정에 따라 제작하였다. Fig. 3에 나타난 시험편의 물림부(grip)는 인장시험 기계에 물리는 부분이므로, 응력이 집중되어 파단이 발생하지 않도록 100 mm 길이의 알루미늄 슬리브를 부착하였다. 모든 시험편에는 Fig. 3과 같이 파단연신율을 측정하기 위한 표점, 즉 Table 1에 나타난 KS, ISO, ASTM의 세 종류 표점 거리를 갖는 표점들을 표시하였고, 균신연신율을 측정하기 위한 100 mm 간격의 표점들도 표시하였다.

인장시험은 서울대학교 극한성능실험센터에서 5,000 kN 용량의 UTM으로 수행하였다. 인장시험 중 시험편의 변형률은 video extensometer를 이용한 영상계측으로도 측정하였고, 시험편이 파단 된 후에 시험을 종료하였다. 시험을 종료한 후에는 KS, ISO, ASTM의 세 종류 표점 사이의 거리를 측정하여 각 표준에 따른 파단연신율을 산정하였다. 시험을 수행한 45개의 철근 시험편 중에서 KS, ISO, ASTM의 세 종류 표준에 따른 파단연신율을 모두 산정할 수 있는 시험편은 23개였다.

Table 2. Variables of test specimens

Classification	Steel bars manufactured by ASTM A615 & A706 (present test)	Steel bars manufactured by KS D 3504 (Lee et al. 2011; Lee et al. 2020)
Diameter	16~57 mm (#4~#18)	10~35 mm (D10~D35)
Specified yield strength and Symbol/Grade	420~550 MPa (Grade 60 and Grade 80)	400~700 MPa (SD400~SD700, SD400S~SD700S)

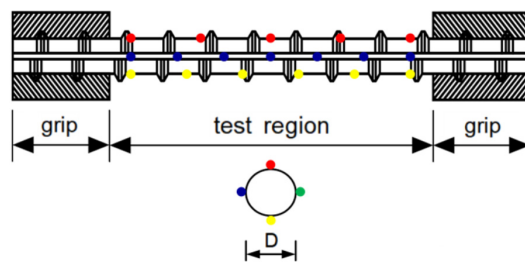


Fig. 3. Test specimen of steel reinforcement

### 4. 시험 결과 분석

#### 4.1 파단연신율의 범위와 편차

ASTM A615의 항복강도와 ASTM A706의 최소연신율 표준에 만족하도록 생산된 45개의 철근 시험편 중에서 KS, ISO, ASTM의 세 종류 표준에 따른 파단연신율을 모두 얻은 23개 시험편의 시험 자료와 KS 표준에 만족하도록 생산된 철근을 대상으

로 한 선행연구(Lee et al. 2011; Lee et al. 2020)의 인장시험 자료 107개를 포함하여, 총 130개의 자료를 대상으로 분석을 수행하였다.

Table 3은 130개의 파단연신율 시험자료를 강종, 즉 KS 일반구조용 철근(SD400, SD500, SD600, SD700), KS 특수 내진용 철근(SD400S, SD500S, SD600S, SD700S), ASTM 철근(grade 60, Grade 80)으로 구분하여 파단연신율( $\delta$ )의 최댓값과 최솟값 및 범위( $\delta_{range}$ )를 나타낸 것이다. 여기서 범위( $\delta_{range}$ )는 각 강종에 나타난 파단연신율( $\delta$ ) 측정값의 최댓값과 최솟값의 차이이다. 한편 ISO 표준은 항복강도 700 MPa 급의 철근에 대한 규격을 규정하고 있지 않아서, SD700과 SD700S 철근에 대해서는 600 MPa 급의 철근에 대한 파단연신율 규격을 적용하였다. Table 3에 나타난 바와 같이 KS 표준에 따라 산정한 퍼센트 단위의 파단연신율 범위( $\delta_{range}$ )는 강종별로 최소 0.9에서 최대 5.9로 전체 평균(total mean) 2.30의 값을 나타내었다. ISO 표준에 따라 산정한 퍼센트 단위의 파단연신율 범위( $\delta_{range}$ )는 강종별로 최소 0.2에서 최대 6.9로 전체 평균 3.48의 값을 나타내었다. ASTM 표준에 따라 산정한 퍼센트 단위의 파단연신율 범위( $\delta_{range}$ )는 강종별로 최소 0.2에서 최대 14.5로 전체 평균 5.59의 값을 나타내었다. 각 표준에 따른 130개 파단연신율 시험자료 전체의 평균값이 파단연신율 측정 용 표점거리 설정방법의 합리성을 판단할 절대적인 근거는 될 수 없을 것이다. 그러나 철근지름과 무관하게 일정한 길이인 8in.(203 mm)를 표점거리로 하는 ASTM 표준에 따르는 경우가 철근 지름의 배수를 표점거리로 하는 KS 표준이나 ISO 표준에 따르는 경우보다 더 큰 변동성을 보인다는 것은 분명해 보인다.

**Table 3.** Range of average fracture elongation ( $\delta$ ) and range ( $\delta_{range}$ ) measured by each standard method

Classification		SD400	SD500	SD600	SD700	SD400S	SD500S	SD600S	SD700S	Grade 60	Grade 80	Total mean
KS	$\delta$ (%)	16.9~19.7	13.1~15.9	10.9~11.7	10.6~12.6	20.1~21.1	14.2~15.2	13.0~14.7	10.8~14.9	18.2~24.1	15.1~16.0	-
	$\delta_{range}$	2.8	2.8	0.8	2.0	1.0	1.0	1.7	4.1	5.9	0.9	2.30
ISO	$\delta$ (%)	19.1~23.7	14.7~17.2	12.0~14.5	6.7~12.5	23.7~23.9	14.6~18.9	15.7~16.3	9.2~16.1	18.2~21.7	16.3~20.0	-
	$\delta_{range}$	4.8	2.5	2.5	5.8	0.2	4.3	0.7	6.9	3.4	3.7	3.48
ASTM	$\delta$ (%)	15.3~20.6	11.1~19.5	12.8~16.9	8.2~15.6	20.0~20.2	12.1~15.5	14.0~17.0	9.7~24.3	14.8~21.9	12.6~15.1	-
	$\delta_{range}$	5.3	8.4	4.1	7.4	0.2	3.4	3.0	14.5	7.1	2.5	5.59

## 4.2 파단연신율 표준의 엄격성

앞에서 기술한 바와 같이 KS, ISO, ASTM의 철근표준은 파단연신율을 측정할 때의 표점거리가 다르게 규정되어 있고 각각 다른 값의 최소 파단연신율을 규정하고 있으므로, 어떤 표준이 더 엄격한 연신능력을 요구하는지 알 수 없다. 따라서 동일한 철근 시험편에 대하여 각 표준에 따라 측정된 파단연신율 값을 각 표준에서 규정하고 있는 최소연신율로 나눈 값으로 파단연신율 표준의 엄격성을 분석하였다. Table 4와 Table 5는 각 철근표준의 엄격성을 평가한 결과로, 측정된 파단연신율 값( $\delta$ )을 각 표준에서 규정하고 있는 최소연신율( $\delta_{standard}$ )로 나눈 값( $\delta/\delta_{standard}$ )의 범위와 평균값을 강종 별로 나타낸 것이다. 이 값( $\delta/\delta_{standard}$ )이 작을수록 파단연신율 조건이 엄격하다고 판단할 수 있다. 이때 일반구조용 철근의 엄격성은 KS D 3504, ASTM A615, ISO 6395-2 Class B에서 규정하는 최소연신율(by requirement for general structural reinforcement)로 나눈 비율로 나타내었으며, 내진용 철근의 엄격성은 KS D 3504, ASTM A706, ISO 6935-2 Class D에서 규정한 최소연신율(by requirement for seismic reinforcement)로 나눈 비율로 나타내었다. 국내 표준만 동일하게 적용한 이유는 KS D 3504는 일반구조용과 내진용 철근의 최소연신율을 모두 동일하게 규정하고 있기 때문이다.

Table 4는 KS 표준에 만족하도록 생산된 철근을 대상으로 한 엄격성 평가 결과이다. Table 4에 나타난 바와 같이 일반구조용 철근(SD400~SD700) 강종 별 엄격성 비율의 평균값(mean of average)은 KS 표준을 적용한 경우 1.20, ISO 표준을 적용한 경우 1.18, ASTM 표준을 적용한 경우 2.08의 값을 보인다. 따라서 KS 표준에 만족하도록 생산된 일반구조용 철근에 대해서는 ISO 표

준이 가장 엄격하고, KS 표준은 ISO 표준과 큰 차이를 보이지는 않으며 ASTM 표준은 상대적으로 덜 엄격하다고 할 수 있다.

KS 표준에 만족하도록 생산된 내진용 철근(SD400S~SD700S)에 대한 엄격성 비율의 평균값은 Table 4에 나타난 바와 같이, KS 표준을 적용한 경우 1.31, ISO 표준을 적용한 경우 1.28, ASTM 표준을 적용한 경우 1.29의 값을 보인다. 따라서 KS 표준에 만족하도록 생산된 내진용 철근에 대한 분석 결과로는 세 가지 표준의 엄격성이 유사하다고 할 수 있다.

Table 5는 ASTM A615의 항복강도와 ASTM A 706의 최소연신율 표준에 만족하도록 생산된 철근을 대상으로 한 엄격성 평가 결과이다. Table 5에 나타난 바와 같이 일반구조용 철근에 대한 표준으로 평가한 엄격성 비율의 평균값은 KS 표준을 적용한 경우 1.57, ISO 표준을 적용한 경우 1.49, ASTM 표준을 적용한 경우 2.08의 값을 보이므로, ISO 표준이 가장 엄격하고 KS 표준은 ISO 표준과 큰 차이를 보이지는 않으며 ASTM 표준은 상대적으로 덜 엄격하다고 할 수 있다.

ASTM A615의 항복강도와 ASTM A 706의 최소연신율 표준에 만족하도록 생산된 철근을 대상으로 내진용 철근에 대한 표준으로 평가한 엄격성 비율의 평균값은 KS 표준을 적용한 경우 1.57, ISO 표준을 적용한 경우 1.44, ASTM 표준을 적용한 경우 1.32의 값을 보이므로, KS 표준이나 ISO 표준에 비하여 ASTM 표준이 다소 엄격하다고 할 수 있다.

**Table 4.** Strictness evaluation of the fracture elongation for reinforcement manufactured by KS

Measuring Method	$\delta$ $\delta_{standard}$	By requirement for general structural reinforcement					By requirement for seismic reinforcement				
		SD400 (400 MPa)	SD500 (500 MPa)	SD600 (600 MPa)	SD700 (700 MPa)	Mean of average	SD400S (400 MPa)	SD500S (500 MPa)	SD600S (600 MPa)	SD700S (700 MPa)	Mean of average
KS	range	1.00~1.44	1.06~1.45	1.04~1.20	1.06~1.31	-	1.13~1.40	1.04~1.39	1.25~1.49	1.08~1.49	-
	average	1.18	1.25	1.13	1.23	1.20	1.27	1.23	1.38	1.34	1.31
ISO	range	0.90~2.45	0.95~1.33	0.85~1.39	0.77~1.26	-	1.13~1.53	0.94~1.60	0.96~1.70	1.09~1.71	-
	average	1.52	1.18	1.01	0.99	1.18	1.40	1.29	1.22	1.20	1.28
ASTM	range	1.47~3.14	1.52~3.93	1.67~2.38	1.49~2.14	-	1.24~1.61	0.91~1.35	1.10~1.56	0.77~1.78	-
	average	2.08	2.46	1.95	1.82	2.08	1.43	1.15	1.33	1.25	1.29

**Table 5.** Strictness evaluation of the fracture elongation for reinforcement manufactured by ASTM

Measuring Method	$\delta$ $\delta_{standard}$	By requirement for general structural reinforcement			By requirement for seismic reinforcement		
		Grade 60 (420 MPa)	Grade 80 (550 MPa)	Mean of average	Grade 60 (420 MPa)	Grade 80 (550 MPa)	Mean of average
KS	range	1.07~1.83	1.33~2.71	-	1.07~1.83	1.33~2.71	-
	average	1.31	1.83	1.57	1.31	1.83	1.57
ISO	range	1.13~2.09	1.13~1.81	-	0.99~1.80	1.22~2.02	-
	average	1.59	1.39	1.49	1.37	1.51	1.44
ASTM	range	1.53~3.17	1.69~2.63	-	0.99~2.22	0.99~1.58	-
	average	2.05	2.10	2.08	1.41	1.24	1.32

### 4.3 네킹 길이

균일연신율은 네킹이 시작되기 직전의 변형률이므로 어떤 길이의 표점거리를 사용하여도 동일한 결과를 제공하지만, 파단연신율은 네킹이 발생한 후 파단될 때의 변형률이므로 네킹 길이(necking length)와 표점거리 사이의 관계가 파단연신율 값에 큰 영향을 줄 수 있다. 즉, 네킹 길이가 철근 지름과 관계가 있다면 표점거리를 철근 지름의 배수로 규정하는 것이 합리적일 것이며, 네킹 길이가 철근 지름과 무관하게 일정한 길이를 갖는다면 표점거리를 일정한 길이로 규정하는 것이 합리적일 것이다. 이를 확인하



기 위하여 이 연구에서 수행된 철근 시험편의 인장시험 후 철근 시험편 23개의 네킹 길이를 측정하였고, Fig. 4와 Table 6에 결과를 나타내었다.

Fig. 4는 철근 지름별 네킹 길이의 측정값으로, 각 철근 지름별 네킹 길이의 평균값은 붉은색의 X표로 나타내었다. Table 6은 철근 지름별 네킹 길이의 평균값( $l_{neck,avg}$ )과 철근 지름에 대한 평균 네킹 길이의 비율( $l_{neck,avg}/d_b$ ) 및 전체 평균 ( $l_{neck,avg}/d_b$ )<sub>mean</sub> 값을 나타낸다. Grade 60 철근은 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 평균 네킹 길이가 철근 지름에 선형으로 비례하는 경향을 보여서, Table 6에 나타난 바와 같이 철근 지름의 1.3~1.8배의 범위로 1.5의 전체 평균 ( $l_{neck,avg}/d_b$ )<sub>mean</sub> 값을 나타내었다. Grade 80 철근은 Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 네킹 길이가 철근 지름에 완전한 선형 관계를 나타내지는 않았으나, 대체적으로 철근 지름이 증가하면 네킹 길이도 증가하는 경향을 나타내었다. Grade 80 철근의 경우는 Table 6에 나타난 바와 같이 평균 네킹 길이가 철근 지름의 1.1~1.8배의 범위로 1.4의 전체 평균 ( $l_{neck,avg}/d_b$ )<sub>mean</sub> 값을 나타내었다. 따라서 네킹 길이가 대체적으로 철근 지름과 선형의 비례 관계가 있다고 할 수 있으므로, 표점거리를 철근 지름의 배수로 규정하는 것이 합리적일 것으로 생각된다.

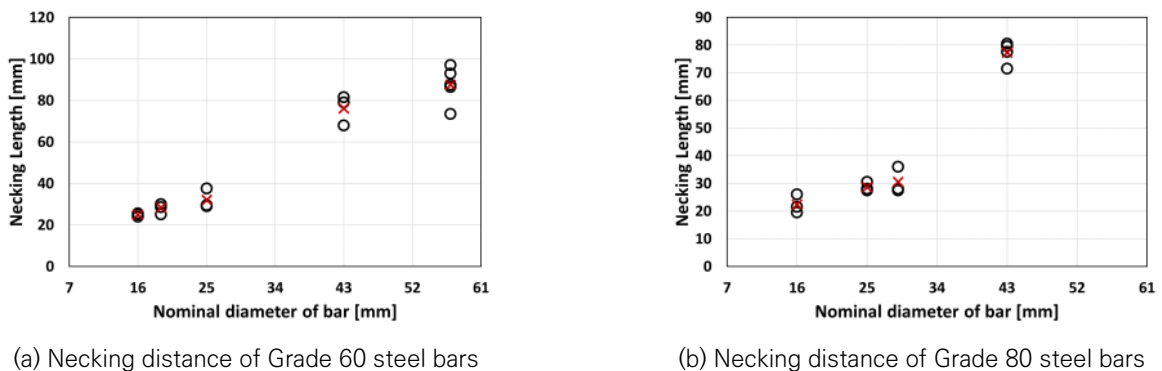


Fig. 4. Fracture Elongation of ASTM Reinforcement

Table 6. Average necking length ( $l_{neck}$ ) and  $l_{neck}/d_b$  ratio

Grade (yield strength)	Diameter $d_b$ [mm]	Average necking length $l_{neck,avg}$ [mm]	$l_{neck,avg}/d_b$	Mean ( $l_{neck,avg}/d_b$ ) <sub>mean</sub>
Grade 60 (420 MPa)	15.9 (D16)	24.8	1.6	1.5
	19.1 (D19)	28.4	1.5	
	25.4 (D25)	32.0	1.3	
	43.0 (D43)	76.2	1.8	
	57.3 (D57)	87.5	1.5	
Grade 80 (550 MPa)	15.9 (D16)	22.3	1.4	1.4
	25.4 (D25)	27.8	1.1	
	28.6 (D29)	30.5	1.1	
	43.0 (D43)	77.3	1.8	

## 5. 결론

이 연구에서는 총 130개의 철근 인장시험 자료에 대한 분석으로 KS 표준, ISO 표준, ASTM 표준에 대한 최소연신율 조건의 엄격성과 네킹 길이를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) KS 표준에 만족하도록 생산된 일반구조용 철근(SD400~SD700)에 대한 강종 별 엄격성 비율의 평균값은 ISO 표준이 1.18로 가장 엄격하고, KS 표준은 1.20으로 ISO 표준과 큰 차이를 보이지는 않으며 ASTM 표준은 2.08로 상대적으로 덜 엄격하다고 판단된다.
- 2) KS 표준에 만족하도록 생산된 내진용 철근(SD400S~SD700S)에 대한 강종 별 엄격성 비율의 평균값은 ISO 표준이 1.28, ASTM 표준이 1.29, KS 표준이 1.31로, 세 가지 표준의 엄격성이 유사하다고 판단된다.
- 3) ASTM A615의 항복강도와 ASTM A706의 최소연신율 표준에 만족하도록 생산된 철근을 일반구조용 철근에 대한 표준으로 평가한 엄격성 비율의 평균값은 ISO 표준이 1.49로 가장 엄격하고, KS 표준은 1.57로 ISO 표준과 큰 차이를 보이지는 않으며 ASTM 표준은 2.08로 상대적으로 덜 엄격하다고 판단된다.
- 4) ASTM A615의 항복강도와 ASTM A706의 최소연신율 표준에 만족하도록 생산된 철근을 내진용 철근에 대한 표준으로 평가한 엄격성 비율의 평균값은 KS 표준이 1.57, ISO 표준이 1.44, ASTM 표준이 1.32의 값을 보이므로, KS 표준이나 ISO 표준에 비하여 ASTM 표준이 다소 엄격하다고 할 수 있으나 매우 큰 차이는 아니라고 판단된다.
- 5) ASTM A615의 항복강도와 ASTM A706의 최소연신율 표준에 만족하도록 생산된 철근 시험편 23개를 대상으로 분석한 결과, 네킹 길이가 대체적으로 철근 지름과 선형의 비례 관계가 있음을 나타내었다. 따라서 파단연신율을 측정하기 위한 표점거리는 철근 지름의 배수로 규정하는 것이 합리적인 것이다.
- 6) KS 표준은 표점거리를 철근 지름의 배수로 규정하고 있지만, D22 이하 철근은 철근 지름의 8배로 하고 D25이상 철근은 철근 지름의 4배로 하여 두 가지 다른 표점거리를 규정하고 있으므로 일관성이 없다고 할 수 있다. 따라서 KS 표준은 파단연신율 측정용 표점 거리를 하나의 철근 지름 배수로 규정할 필요가 있으며, ISO 표준과 같이 철근 지름의 5배로 규정하고 이에 대한 최소 파단연신율을 규정하는 것이 대안이 될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 (주)한국수력원자력의 지원(계약번호: 제 L21S048000호)을 받아 (주)한국수력원자력 중앙연구원과의 공동연구로 수행되었으며, 시설장비 및 실험을 지원해 준 서울대학교 극한성능실험센터에 감사드립니다.

## References

- ACI Committee 349 (2013) *Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures (ACI 349-13) and Commentary*. Farmington Hills, MI; American Concrete Institute (ACI).
- ACI/ASME Technical Committee on Concrete Pressure Components for Nuclear Service (2007) *Code for Concrete Containments (ACI 359-07), ASME Boiler and Vessel Pressure Code, Section III, division 2, Subsection CC-3900*. New York, American Concrete Institute (ACI) and American Society of Mechanical Engineers (ASME).
- ASTM (2022a) *Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement (ASTM A615/A615M)*, USA, American Society for Testing and Materials (ASTM)
- ASTM (2022b) *Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement (ASTM A706/A706M)*, USA, American Society for Testing and Materials (ASTM)
- ASTM (2023) *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, (ASTM A370)*, USA, American Society for Testing and Materials (ASTM)
- ISO (2007) *Steel for the Reinforcement of Concrete-Part 2 : Ribbed Bars (ISO 6935-2)*, International Organization for Standardization (ISO).



- KATS (Korea Agency for Technology and Standards) (1981) *Test pieces for tensile test of metallic materials (KS B 0801)*, Seoul, Korea. (In Korean)
- KATS (Korea Agency for Technology and Standards) (2001) *Method of tensile test for metallic materials (KS B 0802)*, Seoul, Korea. (In Korean)
- KATS (Korea Agency for Technology and Standards) (2021) *Steel Bars for Concrete Reinforcement (KS D 3504)*, Seoul, Korea. (In Korean)
- KEA (Korea Electric Association) (2010) KEPIC (Korea Electric Power Industry Code) Nuclear Safety Related Structures, SNB *Concrete Containments*, Seoul, Korea. (In Korean)
- KEA (Korea Electric Association) (2015) KEPIC (Korea Electric Power Industry Code) Nuclear Safety Related Structures, SNC *Nuclear Safety-Related Concrete Structures*, Seoul, Korea. (In Korean)
- Lee, E. H., Kim, S. H., Park, M. S., and Lee, J. H. (2020) A Study on the Relationship Between Elongation of Reinforcement and Fracture of Flexural Members with Minimum Steel Ratio. *Journal of the Conference of the Korea Concrete Institute*, 183-184. (In Korean)
- Lee, J. H. (2023) *Reinforced Concrete-Strength Design and Limit State Design*, Paju, Korea; Dong Myeong Publishers. (p. 104) (In Korean)
- Lee, J. H., Kim, D. H., and Choi, J. H. (2011) Evaluation of Minimum Extensibility Standard Requirements for Steel Reinforcement. *Journal of the Korea Concrete Institute* 23(5), 559-567. (In Korean)

## 요약

ASTM 표준에 만족하도록 생산된 철근으로 인장시험을 실시하여 KS, ISO, ASTM 표준에 따른 파단연신율을 모두 측정할 수 있게 파단된 23개의 시험결과를 도출하였다. 이 시험결과와 선행연구자가 KS 표준에 준하여 생산된 철근을 대상으로 수행한 시험결과 107개를 합하여, 총 130개의 시험결과에 대한 분석으로 표준별 최소연신율 조건의 엄격성을 비교하였다. 일반구조용 철근의 파단연신율은 KS 표준과 ISO 표준이 유사하게 엄격하였고 ASTM 표준은 덜 엄격하다고 판단된다. 내진용 철근의 파단연신율은 KS, ISO, ASTM 표준이 엄격성에 다소 차이가 있지만 큰 차이를 보이지는 않았다. 네킹 길이는 대체적으로 철근 지름과 선형의 비례 관계가 있으므로, 파단연신율을 측정하기 위한 표점거리는 철근 지름의 배수로 규정하는 것이 합리적이라고 판단된다. 따라서 KS 표준은 표점거리를 하나의 철근 지름 배수로 규정할 필요가 있으며, ISO 표준과 같이 철근 지름의 5배로 규정하고 이에 대한 최소 파단연신율을 규정하는 것이 대안이 될 것이다.

**핵심용어** : 철근, 파단연신율, 표점거리, 네킹 길이, KS 한국 표준, ISO 국제 표준, ASTM 미국 표준