

# 콘크리트중에서의 철근부식형태에 따른 부식철근의 역학적 특성에 관한 연구

## An Evaluation on the Mechanical Performance of a Corroded Rebar as the Corrosion Pattern of Rebar in Concrete

김 형 래\*

KIM, Hyung Rae

---

### ABSTRACT

The purpose of this paper is to find out quantitatively the relationship between the surface shape and the mechanical properties of corroded reinforcement. Three-dimensional measurements were carried out on the surface shape of variously corroded reinforcements and parameters expressing the characteristics of the shape, which included the maximum decrement of sectional area of reinforcement, its distribution along the axis. It was investigated that which parameters could correspond to the mechanical properties of corroded reinforcement and it was confirmed that the maximum decrement of sectional area of reinforcement could express the mechanical properties most appropriately. Finally, this paper proposes a constitutive model of corroded reinforcement for analyzing the structural behavior of reinforced concrete structures considering the localized corrosion of by finite element method.

### 요 약

콘크리트 중의 철근은 시간경과에 따라 콘크리트의 중성화 및 염해 등에 의해 부식이 진전된다. 이러한 철근부식은 콘크리트의 품질편차, 균열발생 등의 영향으로 동일한 부재에서도 부위에 따라 그 정도에 차이가 발생하며, 균일하게 부식이 진전되지 않는다. 따라서, 콘크리트중의 철근이 부식된 부재에 대하여 역학적 특성을 평가함에 있어서 공식이나 국부부식 등을 고려하지 않고 평균부식률에 의해 평가를 하는 것은 철근이 부식된 실제 철근콘크리트 구조체의 내력저하를 평가하는 데에 있어서 한계가 있을 수밖에 없다. 한편, 철근이 부식된 철근콘크리트 구조체의 내력저하를 유한요소법 등에 의해 해석적으로 평가하기 위해서는 부식철근의 역학적 성능에 대한 모델화가 필수적이며, 이를 위해서는 콘크리트중에서의 철근의 부식을 상정한 부식패턴에 대해 정량화하고 이를 역학적 성능과의 관계로서 수식화하는 것이 필요하다.

이에 본 연구에서는 콘크리트내부의 철근부식에 따른 부식형태의 정량화 및 부식철근의 역학적 성능평가를 목적으로 하며, 이를 위해 다양한 패턴의 부식형상을 상정한 철근부식실험을 수행하고 표면형상분석장치에 의해 부식형태를 정량화하였으며, 역학적특성에 대한 평가를 통해 부식도와 역학적 성능의 관계를 정식화하였다.

---

\* 정회원, 현대건설(주), 건축사업본부 건축기술부 기술개발팀 차장, 공학박사

## 1. 서 론

콘크리트중에서의 철근부식형태는 다양한 패턴을 나타낸다. 이러한 불균일한 부식형태로 인해 RC부재의 구조성능에 미치는 철근부식의 영향을 정확히 파악하고, 이를 성능설계나 유지관리계획 등에 반영하는 것이 매우 어렵다. FEM해석으로 철근이 부식한 RC부재의 성능을 평가할 경우, 부식철근자체의 역학적성능은 매우 중요하며, 부위별 부식정도분포에 의해 결정되는 부식형태는 부식철근의 항복점 및 항복이후의 변형경화특성에 큰 영향을 미치는 것으로 예상된다.

국소에서의 철근부식과 그에 따른 철근의 역학적성능저하 및 RC부재의 구조성능저하에 관한 기존의 연구들은 주로 염분부식 등의 마이크로셀부식에 의해 발생하는 공식에 초점을 두어 진행되어 왔으며, 공식계수나 평균단면감소율과 같이 일정한 형태를 나타내는 패러미터에 의해 부식을 평가한 것이 많다. 이에 반해, 매크로셀부식에 의해 국소에 집중적으로 발생하는 국부부식에 대한 연구는 적으며, 공식을 포함하는 국부부식의 형태를 정량적으로 파악하고, 그것이 철근의 역학적성능에 어떠한 영향을 미치는가를 제시한 연구는 거의 없다.

따라서, 본 연구에서는 부식한 철근의 형상을 측정하고, 그 형상 및 형태를 특성화한 패러미터를 도출한 후, 부식형태와 철근의 역학적성능의 관계를 정량적으로 파악하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 실험인자 및 수준

부식철근의 3차원 형상분석과 역학적성능의 평가를 위해 표 1과 같이 실험인자 및 수준을 설정하였다. 다양한 부식형태를 얻기 위해 이형철근과 원형철근을 대상으로 하여 전기부식과 염분부식에 의해 평균값 3~30%정도의 단면감소율이 얻어지도록 촉진부식을 실시하였다.

### 2.2 시험체 제작

콘크리트중의 철근부식을 위한 시험체는 물시멘트비 55%, 잔골재율 46%의 콘크리트로 제작하였으며, 콘크리트 내부에 SD 30의 철근을 매설하였다. 염분부식용 시험체에는 콘크리트중에 6kg/m<sup>3</sup>의 염화나트륨을 첨가하였다. 부식철근의 역학적성능을 평가하기 위한 중앙구

간(L=8D, D는 철근의 직경) 이외의 철근의 양단부는 부식되지 않도록 열수축고무 및 테이프로 피복처리하였다. 사전 균열을 갖는 시험체는 촉진부식을 실시하기 전에 폭 0.4mm미만의 관통균열을 콘크리트에 발생시키고, 철근의 촉진부식종료시까지 균열폭을 유지시켰다.

### 2.3 실험 방법

#### 2.3.1 철근의 촉진부식

전기부식은 그림1과 같이 콘크리트의 상부면에 0.5% NaCl수용액을 담은 수조를 설치하고, 염수속에 넣은 동판과 콘크리트중의 철근 사이에 1mA/cm<sup>2</sup>의 부식전류가 흐르도록 회로를 구성하였다. 염분부식은 70℃, RH-95%에서 2일간, 70℃, RH-50%에서 3일간, 염수침지조건에서 2일간 존치하는 것을 1Cycle로 하여 소정의 Cycle수를 반복하였다.

#### 2.3.2 부식철근의 표면형상측정

부식한 철근의 형상은 프로브 접촉식 3차원 표면형상측정기로 측정하였다. 측정간격은 철근의 직경방향으로 0.2mm, 철근축방향으로 0.5mm간격으로 하였으며, 45°씩 회전시키면서 측정하였다.

그림2와 같이 철근의 축방향으로 철근의 표면형상을 측정하였는데, 측정된 철근표면의 각점의 좌표는 철근의 단면중심을 기준으로 한 좌표가 아니므로, 측정축과 철근의 중심축이 일치하지 않아 축방향과 상하방향으로 미세한 불일치가 발생하였다. 따라서, 철근의 건진부의 좌표를 토대로 부식부분의 좌표를 구하는 것으로 하였는 바, 철근양단에서 단면중심의 좌표를 결정하고, 그 값에 근거하여 측정좌표의 불일치를 보정하였다. 또한, 그림3과 같이 철근을 45°씩 회전시켜 측정한 데이터를 조합하기 위해 좌표변환을 하였으며, 측정값의 연속성을 확보하여 철근의 단면형상을 구하였다.

#### 2.3.3 부식철근의 역학적성능 평가시험

철근의 역학적 성능평가를 위해, 시험편은 철근직경의 8배에 해당하는 길이를 표점거리로 하였다. 특히, 본 연구에서는 국부적으로 부식정도의 편차가 큰 부식철근의 역학적성능을 파악하고 부식형태가

표 1. 실험의 인자 및 수준

실험인자	실험수준	수준수
촉진부식방법	전기부식(E), 염분부식(S)	2
사전균열의 유무	유, 무	2
목표 평균단면감소율	3%, 5%, 10%, 15%, 30%	5
철근의 종류(직경 13mm)	이형철근(D), 원형철근(R)	2

철근의 역학적성능에 어떠한 영향을 미치는가를 평가하기 위해, 부식철근의 신을 뿐만 아니라, 그림 4에 나타난 바와 같이 표점간 거리를 분할하여 부위별 변형특성이 가능하도록 부식철근의 표면에 접착제를 이용하여 평탄하게 하고, 그 위에 변형게이지를 부착하였다.

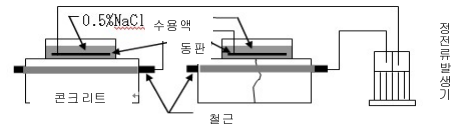


그림1. 철근의 전기부식방법

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 철근부식형태의 정량화

부식철근의 3차원형상측정 및 분석을 통하여 얻은 철근 축방향의 단면감소율의 분포를 그림 5에 나타냈다. 단면감소율 및 침식깊이의 분포로부터 평균단면감소율 및 국부최대단면감소율(「부식철근의 단면적감소의 최대값」/「진전철근의 단면적」×100(%))을 산출하였다. 부식철근의 국부최대단면감소율은 그림6에 나타냈듯이 평균단면감소율의 약 1.8배(전기부식의 경우 2.06배, 염분부식의 경우 1.40배)인 것으로 나타났다. 철근부식에 대한 균열의 영향을 살펴보면, 사전균열이 있는 경우 균열주변에서부터 철근부식이 시작되었으며, 초기에는 균열근처의 철근부식이 국부적으로 탁월한 경향을 보였다. 그러나, 부식이 진전됨에 따라 사전균열이 없는 경우에도 콘크리트의 품질편차 등에 의해 국부적으로 부식속도가 빠른 부분이 생기게 되며, 이로 인해 사전균열이 있는 경우와의 명확한 차이는 확인되지 않았다.

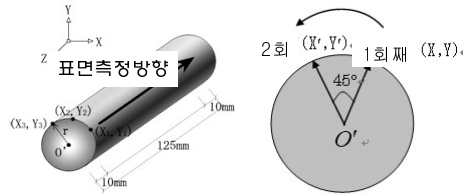


그림2. 표면형상측정 그림3. 좌표변환

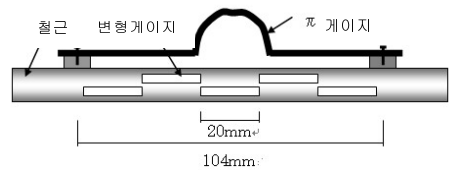


그림4. 인장강력시 변형 측정방법

#### 3.2 부식철근의 역학적특성

##### 3.2.1 부식철근의 응력-변형 관계

부식철근의 부위별(A~E) 단면감소율의 분포와 그 부위에서의 응력-변형 곡선을 그림5에 나타냈다. 부식철근의 부위별로 그 단면감소율에 따라 항복시기가 달라지며, 국부최대단면감소가 발생한 부위에서의 항복에 의해 그 철근의 항복점이 결정되는 것을 알 수 있다. 그림7과 같이 부식에 의한 항복점비(부식철근의 항복점/진전철근의 항복점)의 변화는 평균단면감소율보다 국부최대단면감소율과의 상관관계가 높게 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 국부최대단면감소율에 의해 부식철근의 역학적성능을 평가하는 것으로 하였다.

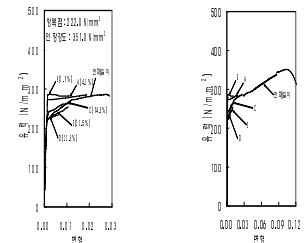
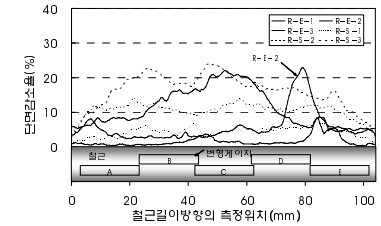


그림5. 부위별 부식단면감소율 분포 및 응력-변형 관계

##### 3.2.2 철근부식형태와 변형경화특성의 관계

부식철근의 항복점 이후의 변형과 항복점에 대한 응력비의 관계를 그림8에 나타냈다. 위에서 기술하였듯이 부식철근의 항복점은 철근의 국부최대단면감소율과 밀접한 관계가 있을 뿐만 아니라, 그림 8에 나타난 바와 같이 부식철근은 항복후 바로 변형경화하는 것을 알 수 있다.

##### 3.2.3 국부최대단면감소율과 역학적성능의 관계

그림9에 부식철근의 국부최대단면감소율과 강도(인장강도, 변형경화개시점, 항복점, 인장강도시점의 변형 및 탄성계수의 관계를 각각 나타냈다. 국부최대단면감소율과 철근의 역학적성능저하는 높은 상관관계를 갖고 있으며, 변형경화개시점을 제외한 다른 역학적성능의 저하율은 국부최대단면감소율의 증가율보다 컸으며, 인장강도시점의 변형저하율이 특히 큰 것으로 나타났다. 또한, 국부최대단면감소율의 증가에 따른 항복점 및 변형경화개시점의 저하율에는 큰 차이가 확인되었는데, 진술하였듯이 부식철근의 항복현상은 우선 국부최대단면감소율을 갖는 좁은 영역에서 우선 항복이 발생하고, 그 후 항복영역이 서서히 철근전체로 확대되어 가는 특징을 나타내므로, 부식철근의 항복점과 국부최

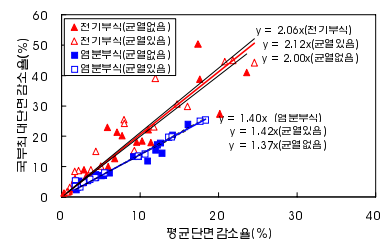


그림6. 평균단면감소율과 국부최대단면감소율의 관계

대단면감소율은 밀접한 관계를 갖고 있다. 한편, 변형경화개시점은 최후에 항복하는 영역의 단면감소율과 관련이 있는 것으로 추정되며, 이로 인해 국부최대단면감소율의 증가에 따른 항복점의 저하에 비해, 변형경화개시점의 저하는 작게 되는 것으로 판단된다. 또한, 평균단면감소율에 비해 국부최대단면감소율이 변형경화율에 미치는 영향이 크며, 국부최대부식이 발생한 영역의 길이가 짧을수록 항복점 이후의 변형경화율이 커지게 되는 것으로 판단된다.

이상의 결과 및 고찰에 근거하여 건전철근의 값을 기준으로 한 부식철근의 역학적 성능의 산정식을 식(1)~식(5)에 제시한다

$$E_{cs} = (1 - 1.14(\Delta W_{max}/100)) \cdot E_{ss} \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

$$F_{cu} = (1 - 1.00(\Delta W_{max}/100)) \cdot F_{su} \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

$$F_{cy}' = (1 - 0.98\alpha^{-0.5412}(\Delta W_{max}/100)) \cdot F_{sy}' \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

$$F_{cy} = (1 - 1.14(\Delta W_{max}/100)) \cdot F_{sy} \dots\dots\dots \text{식(4)}$$

$$\epsilon_{cu} = (1 - 1.73(\Delta W_{max}/100)) \cdot \epsilon_{su} \dots\dots\dots \text{식(5)}$$

여기서,  $\Delta W_{max}$ 는 국부최대단면감소율,  $E_{cs}$ 와  $E_{ss}$ 는 각각 부식철근과 건전철근의 탄성계수,  $F_{cu}$ 와  $F_{su}$ 는 부식철근과 건전철근의 인장강도,  $F_{cy}'$ 와  $F_{sy}'$ 는 부식철근과 건전철근의 변형경화개시점강도,  $F_{cy}$ 와  $F_{sy}$ 는 부식철근과 건전철근의 항복점강도,  $\epsilon_{cu}$ 와  $\epsilon_{su}$ 는 부식철근과 건전철근의 인장강도시의 변형이다. 한편,  $\alpha$ 는 국소화배율로서, 평균단면감소율에 대한 국부최대단면감소율의 비율로 구하는 값이다.

#### 4. 결론

부식철근의 3차원 형상해석을 통해 부식형상을 표현하기 위한 패러미터를 추출하고, 그 패러미터와 부식철근의 응력-변형 곡선의 대응관계에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 부식철근에서 국부최대단면감소율은 평균단면감소율의 약1.8 배에 달하였으며, 염분부식시킨 철근보다도 매크로셀부식을 상정하여 전기부식을 시킨 철근의 경우, 국부에서의 부식집중현상이 현저하며, 국부최대단면감소율이 큰 것으로 나타났다.

(2) 부식철근의 국부최대단면감소율과 역학적성능의 사이에는 높은 상관관계가 얻어졌으며, 평균단면감소율보다 국부최대단면감소율에 의해 더 정도 높게 부식철근의 역학적성능을 추정할 수 있다.

(3) 국부최대단면감소율이 크고, 그 국소부식구간의 길이가 짧은 철근일수록 부식에 따른 변형경화개시점의 저하에 비해 항복점저하가 커지게 되며, 이로 인해 변형경화율도 커지는 것으로 평가되었다.

#### 참고문헌

1. J. Rodriguez, et al., Corrosion of Reinforcement and Service Life of Concrete Structures, Proceedings of 7th International Conference on DBMC, Vol.1, 1996, pp.117-126
2. 이한승 외, 인장주근이 부식한 RC보의 유한요소해석에 의한 내력성능평가에 관한 기초적 연구, 일본건축학회구조계논문보고집, No.506, 1998, pp.43-50
3. Mark G. Stewart, Spatial Variability of Pitting Corrosion and its Influence on Structural Fragility and Reliability of RC Beams in Flexure, Structural Safety, 26, 2004, pp.453-470
4. 岡村甫 외, 철근콘크리트의 비선형해석과 구성칙, 기보당출판, 1990

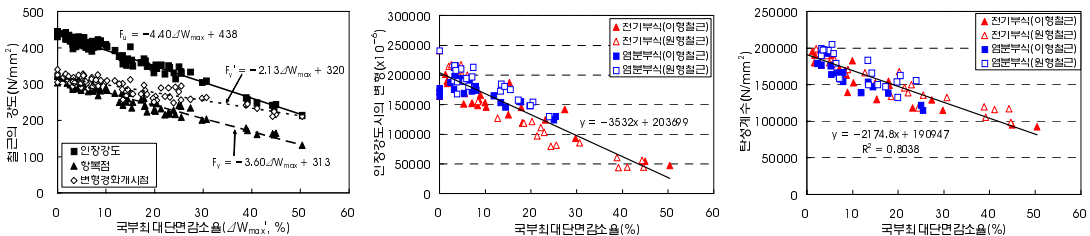


그림9. 국부최대단면감소율과 철근의 역학적성능의 관계

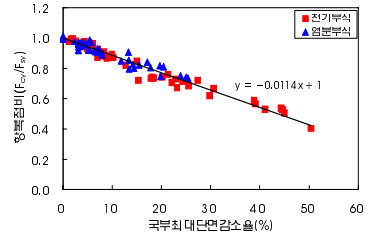
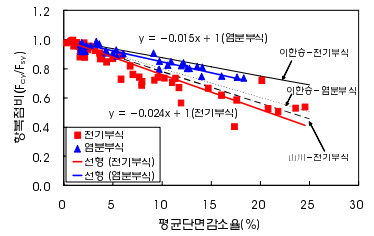


그림7. 항복점비와 단면감소율의 관계

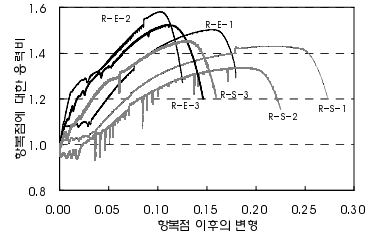


그림8. 항복점이후의 변형과 항복점에 대한 응력비의 관계