

## 전기화학적 염화물 추출 후 철근-콘크리트 보의 휨 거동

# Flexural Behavior of RC Beam After Completion of Electrochemical Chloride Extraction

이정욱<sup>1</sup> · 안기용<sup>2\*</sup>Jung Wook Lee<sup>1</sup> · Ki Yong Ann<sup>2\*</sup>

(Received November 8, 2023 / Revised November 16, 2023 / Accepted November 17, 2023)

The structural behaviour of concrete beam was examined by the three points bending test after the completion of the electrochemical chloride extraction (ECE), rather than bond strength mostly measured in previous studies. It was found that the flexural rigidity of concrete was lowered by the ECE, but the strength was enhanced in terms of the maximum load. The flexural rigidity, in the linear elastic range, was reduced by the loss of effective cross-section area. In fact, the inertia moment was substantially subjected to 70 % loss of the cross-section by the tensile strain at the condition of the failure. However, a lower rate of the inertia moment reduction was achieved by the ECE, implying the higher resistance to the cracking, but the higher risk of deformation.

**키워드 :** 구조적 거동, 보, 전기화학적 염화물 추출, 휨 강성, 단면이차모멘트 감소

**Keywords :** Structural behaviour, Beam, ECE, Flexural rigidity, Inertia moment reduction

## 1. 서론

철근 부식은 철근-콘크리트 계면과 콘크리트 물성치를 변화시키기 때문에 구조물의 거동에 영향을 미친다. 철근 표면에 발생된 녹은 계면사이 존재하는 공극을 채우게 되면(Liu and Weyers 1998; Vu et al. 2005; Hwang and Ann 2023), 콘크리트에 대한 철근의 마찰력 증대로 부착강도가 증가될 수 있다. 하지만 압도적 수준의 철근 부식은 결과적으로 콘크리트와 철근의 부착 강도를 감소시키게 된다. 더욱이 철근부식은 콘크리트 내부에 응력으로 작용하여 균열을 발생시킬 수 있으며, 이로 인해 구조물의 성능을 저하시킬 수 있다. 철근 부식은 콘크리트 구조물의 휨능을 저하시켰으며(Dong et al. 2017; Yalciner and Kumbasaroglu 2020; Torres-Acosta et al. 2007), 부식이 진행 정도에 비례하여 휨강도 또한 저하됨이(Azad et al. 2007) 선행연구를 통해 보고되었다.

철근 부식에 의한 구조물 성능 저하 방지의 일환으로 전기화학적 염화물 추출(Electrochemical Chloride Extraction, ECE) 기법이 대두되고 있다. ECE는 다른 방식 또는 제염법에 비해 녹 제거

측면에서 압도적으로 우수한 성능을 보이지만, 구조물 성능 측면에서 원상태로의 복구 또는 보강은 불가능하다. 실제로 ECE는 철근 주변의 염화물을 추출함으로써 부식 진행을 억제시킴과 동시에 녹을 제거한다. 제거된 녹으로 인해 철근 단면이 손실됨에 따라 구조물의 성능도 저하된다. 이러한 철근 단면 손실로 인해 철근과 콘크리트 간 부착강도는 건전상태 대비 30-80 % 감소되는 것으로 보고되고 있다(Ihekwaba et al. 1995; Zhang and Gong 2014; Elgebaley et al. 2019; Li et al. 2017; Lin et al. 2019). 철근부식에 따른 구조물의 생애주기 및 안전성 평가 측면에서 부착강도 외에도 구조적 성능을 대변하는 강도(strength) 및 강성(stiffness)의 변화 또한 주요 요인이 되나, 현재 대부분의 연구에서는 부착강도를 주로 다루고 있다. ECE에 의한 전기 흐름은 시멘트 매트릭스 내부 이온의 이동에 영향을 미치게 된다. 그 결과 시멘트 내 공극(pore)과 균열에 이온/분자를 침전시킴으로써 콘크리트의 공극 구조와 물성을 개선시킬 수 있다. 또한 철근 부식을 일정 수준 완화시켜 철근-콘크리트 구조물의 내구성 향상에 도움이 될 수 있다. 반면에 고전압의 ECE 처리과정에서 철근으로부터 기체 수소가 방출될

\* Corresponding author E-mail: kann@hanyang.ac.kr

<sup>1</sup>한양대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Department of Civil & Environment System Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do, 15588, Korea)

<sup>2</sup>한양대학교 건설환경공학과 교수 (Department of Civil & Environment Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do, 15588, Korea)

Copyright © 2023 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

가능성이 있으며(Vrable 1977), 이로 인해 수소 취화(hydrogen embrittlement)로 인한 철근의 강도 저하와 철근과 콘크리트의 분리 가능성이 있다(Reou and Ann 2010).

본 연구에서는 ECE 처리 완료 후 철근-콘크리트 구조물의 3점 재하시험을 통해 힘 거동을 분석하기 위해 ECE 처리 후 인장영역의 변형률을 측정하여 수직방향 변형률분포를 추정했다. 또한 3점 재하 시험으로부터 측정된 곡률-힘 모멘트 관계로부터 보의 강성도를 평가 했으며, 단면 2차모멘트 변화를 산정함으로써 콘크리트 보의 연성도와 인장균열에 대한 저항성을 평가했다. 본 논문의 목적과 범위는 ECE 처리가 철근-콘크리트 보의 힘 거동에 미치는 영향을 분석하는 것이므로 부식 메커니즘과 ECE의 효능성 등은 본 연구의 범위에 포함되지 않는다.

## 2. 시험과정

철근 부식이 완료된 후 ECE 처리를 통해 염화물을 추출 했으며, 시편의 부식은 염화물을 희석시킨 배합수를 사용하여 보를 양생시킨 형식(Type A)과 보 상부에서 급수장치를 이용하여 염화물을 침투시키는 형식(Type B)으로 진행되었다. 부식 처리과정에서 Type A는 철근의 부식 과정을 가속시킬 수 있으며, Type B는 실제 RC 구조물에 염분침투 과정을 모사할 수 있는 효과가 있다. Type A는 NaCl을 시멘트 중량의 5.0 % 수준으로 희석된 용액을 배합수로 사용하여 콘크리트를 배합하였으며, 56일 동안 양생 후 365일 동안 야외에 방치하였다. Type B는 시편 상단에 아크릴판의 수조를 통해 염화물 공급이 이뤄졌으며, 콘크리트 내부의 철근 근입 깊이까지 염화물이 침투 할 수 있도록 4.0M NaCl 용액을 아크릴 수조에 주입했다. 또한 2주 간격으로 농도를 측정하고 물과 NaCl을 첨가하여 염화물 농도를 유지시켰다. 시험에서의 대조군은 염분침투로 인한 철근 부식이 없으며 ECE 처리가 적용되지 않은 시편으로 선정했다. 이는 철근 표면에 형성된 녹으로 인해 부착강도가 강화되는 효과를 구분함으로써, 구조물의 성능에 대한 철근부식과 ECE 처리의 영향 명확하게 분석하기 위함이다. 또한 ECE 처리 전 부식 전류 측정을 통해 철근이 충분히 부식되었음을 확인했다.

### 2.1 시편 제작

콘크리트 시험체는 160 × 160 × 1000 mm의 크기로 제작 되었다. 재료가 ECE에 미치는 영향을 최소화하기 위해 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC)만을 사용했다. 콘크리트 시험체는 160 × 160 × 1,000 mm의 크기로 제작 되었으며,

Table 1. Mixture proportions of concrete

f <sub>ck</sub> (MPa)	G <sub>max</sub> (mm)	W/b (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
					C	W	S	G	SP
35	10	45	47	5.0	380	171	805	925	1.9

피복 두께는 20.0 mm로 설정했다. 재료가 ECE에 미치는 영향을 최소화하기 위해 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC)만을 사용했다. 콘크리트 목표설계기준강도는 35 MPa, 물-시멘트비는 0.45로 고정하고 시험체 피복두께를 고려하여 굵은골재최대치수는 10 mm인 골재를 사용하였으며, 잔골재와 굵은골재의 비중은 각각 2.60 및 2.65였다. 굳지 않은 콘크리트(fresh concrete)의 유동성을 보장하기 위해 시멘트 중량 대비 0.5 % 수준의 폴리카르본산계 고성능 감수제(Superplasticiser)를 사용하였으며, Table 1에 콘크리트 배합표를 나타내었다. 시편은 ECE 처리기간과 염분침투 조건에 따른 철근-콘크리트 보의 힘 거동 검토를 위해 대조군(Control)을 포함하여 총 9개가 제작 되었다. 모든 시편들의 피복두께는 앞서 언급된 것처럼 20.0 mm로 동일하게 적용되었는데, 이는 철근의 부식 속도를 가속시키기 위함이다. 이 피복 두께는 구조물의 안전성 확보 측면에서 설계기준에 부합되지 않을 수 있으나, 모든 시편에 동일한 피복 두께를 적용되었기 때문에 본 연구의 목적인 ECE 처리 후 철근-콘크리트 보의 거동 비교에 큰 영향을 미치지 않는다.

부식전류밀도 및 ECE 처리 시 인가전류 등의 부식 데이터를 보다 정확하게 측정하기 위해 Ø16 × 1040 mm의 원형철근이 사용되었다. 또한, 원형철근을 사용함으로써 철근 부식이 부착강도, 최대하중 및 힘 모멘트와 같은 구조적 성능에 미치는 영향을 보다 명확히 검토 될 수 있다. 콘크리트에 근입된 부위에서만 철근 부식이 발생할 수 있도록 철근의 양 끝단에 cement-rich paste로 처리 후 열 수축 밴드를 부착했다. 이러한 마스킹 과정을 마친 후 철근의 한쪽 끝단에는 crock jack과 전선으로 연결됐다. 철근 간격 60.0 mm이며, 매립 깊이는 보의 하부로부터 20.0 mm로 유지됐다. 실제로 해양환경 조건의 콘크리트 구조물 설계 기준에서는 피복 두께를 60.0 mm 이상으로 제시 하고 있으나, 제한된 기간 내에 부식 개시를 보장하기 위해 피복 두께에 대한 설계기준을 충족시킬 수 없다(ACI 365.1R-17, 2017).

### 2.2 구조적 특성 검토 설정

본 연구에서는 ECE 처리 후 철근-콘크리트 보의 사용성에 큰 영향을 미치는 구조적 거동에 주안을 두고 있다. 철근-콘크리트

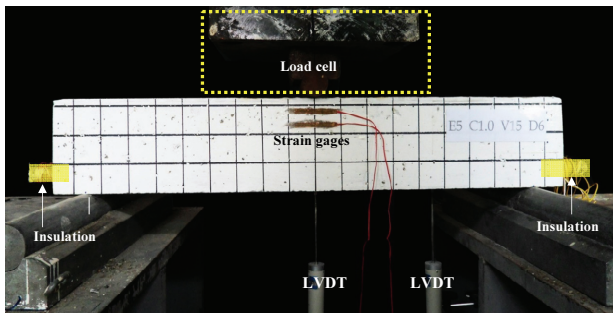


Fig. 1. Three points bending test to investigate flexural behaviour of beam after the completion of the ECE

보의 구조적 거동은 휨 강도, 휨강성, 인장변형률, 유효단면의 단면2차모멘트 등을 통해 평가되었으며, 이를 위해 Fig. 1과 같이 3점 재하 시험이 수행되었다. 시험에 앞서 철근 부식 촉진 및 ECE 처리를 위한 장치들을 모두 제거 후, 세척하여 24시간동안 건조시켰다. 본 연구에서 ECE 처리된 시편은 대조군(Control)과 미처리 시편(Untreated) 시편과 비교됐으며, 이를 통해 보의 휨 거동에 대한 ECE의 영향이 분석됐다. 여기서, 대조군은 부식 조건이 부여되지 않은 시편이며, 미처리 시편은 철근은 부식되었으나 ECE가 적용되지 않은 시편이다. 3점 재하 시험에서 하중은 변위 제어하중이 적용되었으며, 2,000 kN 용량의 유압식 원통형 로드셀을 사용하였다. 시험과정에서 발생할 수 있는 동역학적 효과(Dynamic effect)를 제거하기 위해 변위하중은 총 40 mm를 수직방향으로 500초 동안 재하했다. 또한 단순 지지 보의 중앙 경간의 수직 변위는 0.01 mm 정확도의 LVDT를 통해 계측되었다. 또한 콘크리트 보의 휨 변형률은 보 상단으로부터 25 mm와 50.0 mm지점에 부착된 변형률 게이지로부터 측정됐으며, 이때 변형률 데이터는 데이터 로거에서 10 Hz 간격으로 측정되었다. 단면의 수직방향 변형률은 선형으로 분포되는 것으로 가정하여, 보의 압축부 두 지점의 변형률로부터 인장부의 변형률이 도출됐다. 추가적으로 ECE 처리의 철근 표면 녹 제거 효과확인을 위해 휨 시험 종료 후 철근을 탈거하여 육안검사를 진행했다.

### 2.3 구조적 거동 분석

3점 재하시험을 통해 1) 연성(ductility), 2) 강성(rigidity), 3) 휨(flexibility) 그리고 4) 강도(strength)의 관점에서 철근-콘크리트 보의 거동이 분석됐다. 이를 위해 우선적으로 단면의 변형률 분포가 산정되었다. 이는 압축부의 두 지점(보의 깊이 25와 50 mm)에서 계측된 변형률로부터 산정되었으며, 이 변형률은 균열 발생에 따른 유효단면 손실로 인해 중립축의 위치가 단면 깊이 50

mm 지점으로 상승될 때까지 계측되었다. 측정 결과 두 지점(보의 깊이 25와 50 mm)의 압축 변형률은 하중의 크기에 상관없이 깊이에 비례했으며, 단면 깊이에 따른 변형률 분포에 따른 가정 사항에 따라 계측된 압축부의 변형률로부터 인장부의 변형률이 산정됐다. 이를 통해 단면 깊이에 따른 변형률 분포가 결정됐으며, 시편의 곡률(Curvature)과 휨 모멘트는 이 변형률 선도와 보 시편의 중립축 사이의 각을 이용하여 계산됐다. 그 밖에 균열 모멘트, 유효 단면 2차 모멘트 등은 ACI 318-19.(2019)에 의해 계산되었다.

## 3. 시험 결과

### 3.1 ECE 처리된 보의 연성변화

수직방향 하중에 따른 압축변형률은 Fig. 2와 같이 콘크리트 보 시편의 상단으로부터 50 mm 위치에서 변형률 게이지를 사용하여 측정됐다. 축방향 하중에 대한 압축 변형률은 콘크리트 시편에 적용되는 ECE 처리에 크게 의존하는 것으로 나타났다. 실제로 Control 최대 변형률은  $-50 \times 10^{-6}$  m/m로 수직방향 하중의 크기가 60 kN일 때 발현됐으며, 미처리 시편을 포함한 2, 4주간 ECE 처리된 Type A 시편들의 최대변형률이 발현되는 수직방향 하중 범위는 27~32 kN로 Control에 비해 크게 낮아졌다. 반면 8주간 ECE 처리된 Type A 시편의 최대 변형률은 수직방향 하중이 32 kN일 때  $-90 \times 10^{-6}$  m/m로 나타났는데, 이는 8주간의 ECE 처리를 통해 콘크리트 보가 연성화되었음을 의미한다. 이를 제외한 나머지 시편들은 Control에 비해 더 낮은 수직 하중과 변형률이 발현되었다. 이는 철근부식과 짧은 기간의 ECE 처리로 인해 콘크리트 보의 유연도가 건전상태에 비해 저하되었음을 의미한다.

Type B 시편들의 경우에도 ECE 처리는 압축변형률과 수직 하중의 관계에 영향을 미쳤다. 특히 유사한 수준의 수직하중 조건에서 Type B의 ECE 미처리(Untreated) 시편의 변형률은 Type A의 ECE 미처리 시편보다 더 크게 나타났다. 즉, Type A와 달리 Type B의 시편들은 철근 부식에 의해 연성도가 증가되었다. 또한 다른 시편들에 비해 8주간 ECE 처리된 시편의 연성도가 가장 높게 평가되었다. Type B 시편들의 압축변형률과 수직하중 관계에서의 기울기는 각 시편들의 강성을 대변할 수 있다. 이를 통해 ECE 처리는 Untreated에 비해 구조물의 강성을 증가시킬 수 있지만, 건전상태까지 회복시키지 못함을 알 수 있다. 또한 단기적인 ECE 처리(2, 4주)는 구조물의 연성과 강성을 모두 저하시키는 반면, 장기적인 ECE 처리(8주 이상)는 구조물의 강성을 저하시킬지라도 높은 연

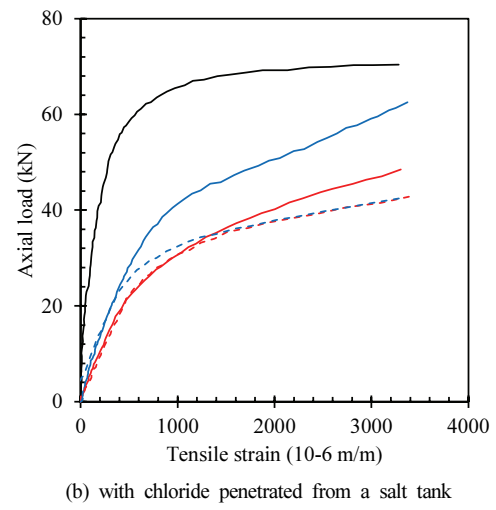
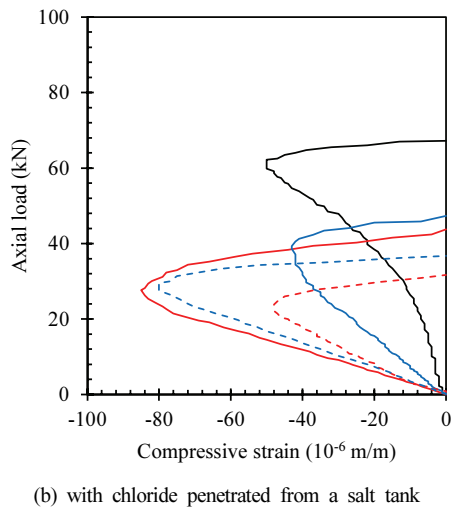
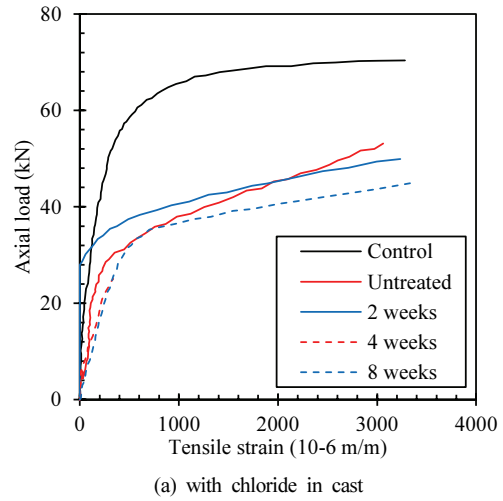
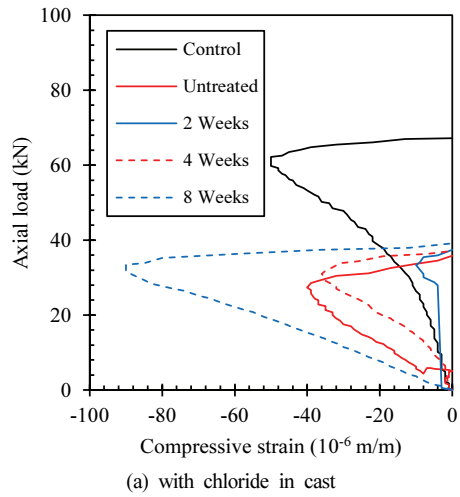


Fig. 2. Compressive strain measured at 50 mm from the top of the concrete specimen

Fig. 3. The axial load against tensile strain obtained from compressive one

성을 향상시킬 수 있었다. 다만, 미처리 시편과 8주간 ECE 처리된 시편의 연성이 유사한 수준으로 나타난 것은 철근 표면에 생성된 녹이 콘크리트와 철근 사이 존재하는 계면을 채움으로써 발생되는 구조적 성능 강화로 판단된다. 따라서 실제 현장에서는 ECE 적용 여부와 적용 기간 즉, 적절한 수준의 전류밀도와 지속시간에 대한 합리적 판단이 필요할 것이다.

ECE 처리된 콘크리트 보의 인장부에서 발생하는 응력에 대한 저항능력을 평가하기 위해 수직 하중 증가에 따른 인장부 변형률을 Fig. 3과 같이 나타냈다. 인장변형률은 시편의 압축부에서 측정된 변형률로부터 도출되었다. 즉, 깊이 방향에 대한 시편의 변형률은 선형적으로 분포된다는 가정하여 시편의 깊이와 압축 변형률 측정치 사이의 비례관계를 통해 계산되었다. Control의 탄성한계 상태 하중이 Type A의 모든 시편들의 탄성한계 상태 하중

보다 크게 나타났으며, ECE 처리 기간에 따른 탄성한계 상태 하중은 거의 변화되지 않았다. 이를 통해 ECE 처리 기간은 콘크리트 보의 인장응력에 대한 저항능력에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

이러한 현상은 Type B의 시편에서도 유사하게 관찰되었다. 즉 Control을 제외한 모든 시편들의 탄성한계 상태 하중은 동일한 인장 변형률에 대해 더 낮게 나타났다. 그러나 ECE 처리 기간의 증가는 탄성한계 상태 하중을 감소시켰으며, 이는 ECE 처리 기간의 증가에 따라 균열에 대한 콘크리트 보의 저항 능력이 감소됨을 의미한다. 특히, 8주간 ECE 처리된 시편의 탄성한계 상태 하중이 가장 낮게 나타났는데, 이 값은 미처리 시편과 비슷한 범위에 있었다. 철근에 부식이 시작되면 철근-콘크리트 구조물은 인장응력에 대한 저항력을 상실하게 되고, 이에 따라 인장균열에도 더욱 취약

해진다. 인장응력에 대한 저항성 측면에서 부식에 의한 철근-콘크리트 구조물의 성능은 ECE 처리에 의해 향상 될 수 있다. 그러나 이러한 ECE 처리에 따른 구조적 성능 회복 효과는 압도적으로 긴 기간의 ECE 처리로 인해 상쇄될 수 있다.

염화물 침투 형태 즉, Type A와 B 시편들의 축하중과 인장변형률의 관계에서 나타난 차이점은 철근 부식 형태의 차이로부터 발생될 수 있다. Type A 시편들의 철근에 형성된 녹은 비교적 균일하게 분포되는 반면, Type B 시편들의 철근 부식 형태는 매우 불규칙하게 염분 침투방향으로 치우쳐 분포될 것이다. 결과적으로, ECE 처리 후 철근-콘크리트 계면에서 Type A 시편에 배근된 철근의 단면은 균일하게, 그리고 Type B에 배근된 철근의 단면은 불규칙하게 유지될 것이다. 이로인해 Type A 시편들의 구조적 성능 측면에서 ECE 처리는 큰 영향을 미치지 못 할 수 있다. 반면에 철근 표면에 균일하게 형성된 녹은 철근-콘크리트 계면을 균일하고 조밀하게 채울 수 있어서 구조적 성능을 강화시킬 수 있다. 따라서 균일한 철근 부식 조건에서 콘크리트 구조물의 성능은 ECE 처리보다 철근에 형성된 녹의 양에 더욱 민감하게 응답하게 된다. 그러나 Type B 시편들에 배근된 철근의 녹은 염화물 침투 방향에 따라 철근 표면에 불규칙하게 분포되므로, 또한 Type B 시편들 철근 표면에 형성된 녹은 Type A의 경우에 비해 계면의 공극을 효율적으로 채울 수 없어서 부식에 의한 구조물의 성능에 대해 미미한 영향을 미치게 된다. 반면 ECE 처리로 인한 철근-콘크리트 계면 상태 개선에 있어 더 효과적일 수 있겠다. 따라서 Type A에 비해 Type B 시편들에서 ECE 처리에 따른 철근 표면의 녹 제거 효과는 상대적으로 우수하게 발현될 수 있으므로 구조적

거동에 미치는 영향 또한 크게 나타난다.

### 3.2 휨강성에 대한 ECE 영향

ECE가 적용된 시편들의 휨 거동은 중앙 경간의 수직 변위에 대한 휨모멘트로 Fig. 4와 같이 나타냈다. 최대 휨 모멘트와 중앙 경간의 수직 변위는 회로에 공급되는 전하량을 의미하는 ECE 처리기간과 염화물 침투 형태에 크게 의존했다. 염화물 침투 형태의 차이에 의해 Type B 보다 A의 철근에 비교적 균일한 녹이 분포되며, 철근-콘크리트 계면을 균일하고 조밀하게 메우게 된다. 마찬가지로 ECE 처리 후 철근-콘크리트 계면의 공극 또한 Type A가 B 보다 더 균일하고 조밀한 상태를 유지하게 된다. 이는 시편의 유효단면 증가로 귀결되어 휨강성을 증가 시키게 된다. 실제로 휨 모멘트는 중간 경간의 수직 변위가 0.004~0.005 m일 때 최대로 발생되었으며, 중간 경간의 수직변위가 증가하여 0.01~0.02 m에 도달 후 감소되었다. Type A와 B의 ECE 미처리 시편들의 중앙 경간 변위와 최대 휨 모멘트는 각각  $4.99 \times 10^{-3}$  m에서 24.10 kN·m와  $4.50 \times 10^{-3}$  m에서 22.86 kN·m로 Control과 ECE 처리된 시편들보다 크게 나타났다. 실제로 Control의 최대 휨 모멘트는 중간 경간 수직 변위  $3.24 \times 10^{-3}$  m일 때 17.60 kN·m로 나타났다. 철근 부식과 ECE 처리는 시편들의 휨 변형에 대한 저항 측면에서 구조적 성능을 Control 보다 향상시키는 효과를 보였다. 즉, Type A의 경우 ECE 처리 기간 증가에 따라 최대 휨 모멘트와 이에 상응하는 변위는 감소됐나, Type B의 경우 ECE 처리 여부와 최대 휨 모멘트 사이에는 아무런 인과성이 없는 것으로 나타났다. 실제로 2주간 ECE 처리된 시편의 최대 휨 모멘트는 4, 8주간 ECE 처리

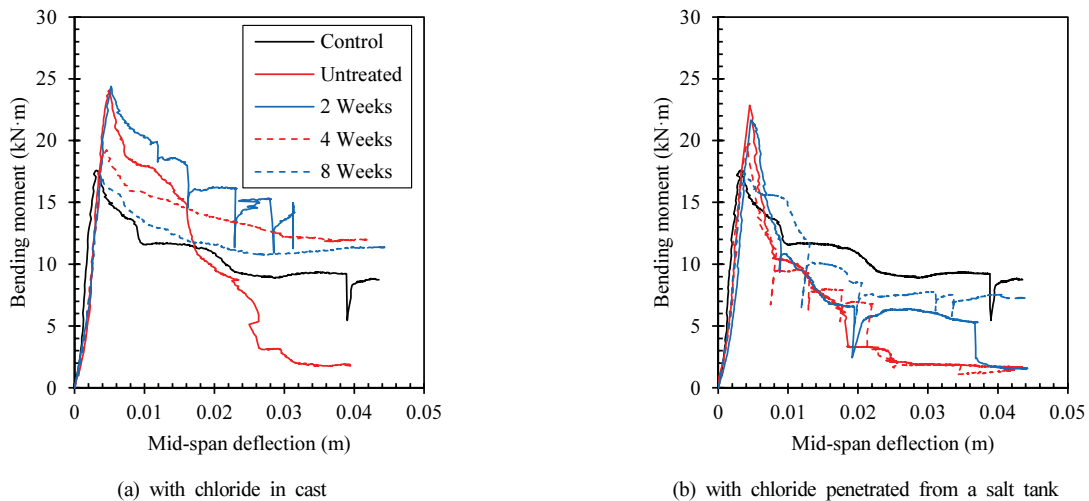


Fig. 4. The bending moment with respect to the mid-span deflection

Table 2. The maximum bending moment with respect to mid-span deflection

	Chloride in cast		Chloride penetrated	
	Deflection ( $\times 10^{-3}$ m)	Bending moment (kN·m)	Deflection ( $\times 10^{-3}$ m)	Bending moment (kN·m)
Control	3.24	17.60	3.24	17.60
Untreated	4.99	24.10	4.50	22.86
2-Weeks	5.24	24.39	4.61	21.64
4-Weeks	4.55	19.29	4.07	19.82
8-Weeks	4.07	16.98	3.65	17.38

된 시편 최대 휨 모멘트 보다 더 작게 나타났으며, ECE 처리기간이 증가될수록 중앙 경간의 변위는 감소했다. 철근 부식과 함께 표면에 형성된 녹은 그 직경을 증가 시키게 되고, 이는 결과적으로 합성체로서의 철근 콘크리트의 단면 2차 모멘트를 증가 시키게 된다. 또한 염화물 침투와 철근 표면의 녹에 의해 콘크리트와 철근의 물성치 또한 변화되고 이는 탄성계수 변화로 귀결될 수 있다. 이러한 측면에서 수직하중과 휨 모멘트의 탄성구간 기울기의 차이가 발생되는것으로 판단된다.

철근-콘크리트 보의 휨 거동에 대한 ECE의 영향을 보다 명확하게 정의하기 위해, 최대 휨 모멘트와 이에 상응하는 중앙간단 변위를 Table 2에 정리했다. Type A의 경우, 8주간 ECE 처리된 시편을 제외한 모든 시편들의 최대 휨 모멘트는 Control 보다 높았다. 이는 철근 표면에서 형성된 녹이 계면의 공극을 채워 구조물의 성능을 향상 시킬 수 있기 때문이다. 그러나 철근이 부식된 시편과 ECE 처리된 시편들은 모두 Control에 비해 중앙 구간 변위가 더

크게 나타났다. 이는 ECE 처리를 통한 부식된 철근 복원으로 철근-콘크리트 구조물의 연성도가 증가됨을 의미한다. Type A와 B 시편들의 최대 휨 모멘트를 크기순으로 나열하면 각각 2 주간 처리 시편 > 미처리 시편 > 4주간 처리 시편 > Control > 8주간 처리시편, 미처리 시편 > 2 주간 처리 시편 > 4주간 처리 시편 > 8주간 처리시편 > Control 순과 같다. 이를 통해 최대 휨 모멘트의 크기는 염화물 침투 형식에 따라 달라짐을 분명히 알 수 있었다. Type A 시편들의 경우 일반적으로 균일한 부식이 철근에 발생됨에 따라 ECE 처리 여부와 관계없이 철근 표면에는 균일하게 잘 분포된 녹이 형성되고 상대적으로 균질한 표면형태를 갖게 된다. 반면에 Type B 시편들의 경우 염화물의 침투가 용이한 영역에 부식이 집중되어 불규칙적인 녹 (pitting)이 발생된다. 그러므로 ECE 처리로 인해 철근 부식이 복원 된다 하더라도 철근 표면의 임의의 위치에는 잔류 녹이 존재하게 되고 그 결과, 잔류 녹은 구조물의 거동에 영향을 미치게 된다.

### 3.3 ECE 처리에 따른 강도와 유연도

콘크리트 보의 인장부에 발생하는 균열로 인한 단면 손실을 조사하기 위해 인장 변형률에 대한 단면2차모멘트의 감소를 Fig. 5와 같이 나타냈다. 단면2차 모멘트는 인장 변형률의 증가에 따라 0.7로 수렴되었는데, 이는 인장변형에 의한 모든 시편균열에 의해 단면의 70 %가 손실됨을 의미한다. 또한 부식 및 ECE 처리 여부와 관계없이 단면 손실량은 모두 유사했으나, 최종적인 단면 손실 상태까지 이르는 속도는 ECE 처리기간과 염화물 침투 유형에 크게 의존했다. 실제로 Control의 단면2차 모멘트 감소율이 가장 크게

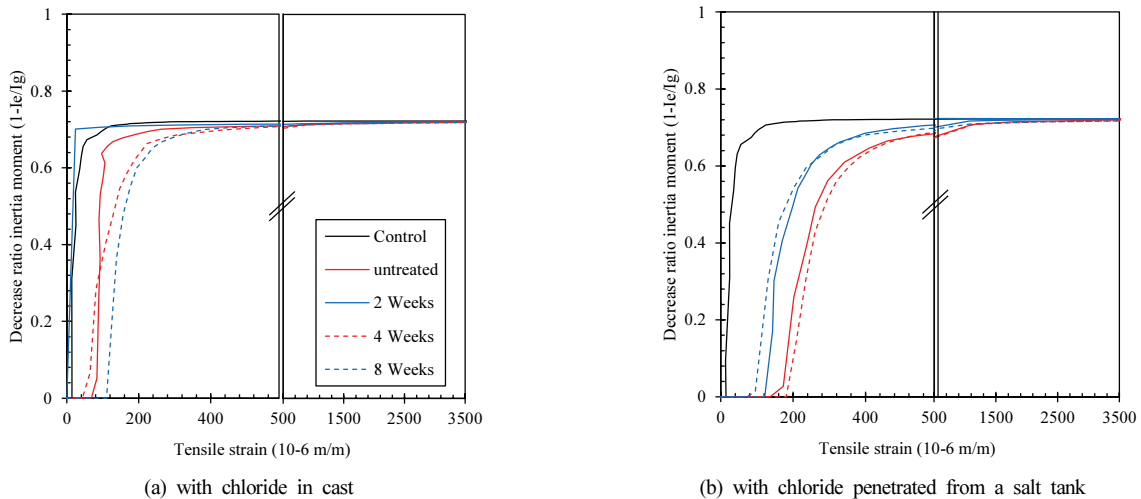


Fig. 5. A reduction of inertia moment in terms of tensile strain

나타났는데, 이는 건전상태의 콘크리트 구조물이 갖는 취성 때문인 것으로 판단된다. Type A 중 2주간 ECE 처리된 시편의 단면2차 모멘트 감소율은 Control과 유사했으며, 이를 제외한 나머지 시편들의 단면2차 모멘트 감소율은 Control에 비해 작게 나타났다.

미처리 시편과 ECE 처리된 시편의 단면2차 모멘트 감소율은 유사한 범위로 나타났으며, 이는 ECE 처리는 인장변형에 의한 단면 손실에 측면에서 악영향을 미치지 않음을 시사한다. 실제로 철근이 부식된 시편의 단면2차 모멘트 감소율이 Control에 비해 낮은 것은 직관적으로 예측 불가능한 결과로서, 이는 ECE 처리에 의해 철근-콘크리트 구조물의 유연도가 증가했기 때문으로 추정된다. 또한 콘크리트 내 철근 부식은 구조물의 연성을 향상시킬 수 있음을 시사한다. 이를 미루어 보아 ECE 처리는 구조물의 연성을 증가시켜 인장 변형에 대한 철근-콘크리트 구조물의 취약성을 보완하여 균열 가능성을 저감시킬 수 있다.

#### 4. 구조물 거동에 대한 ECE 영향 인자

구조적 성능에 대한 ECE의 영향은 현재까지 연구된바가 거의 없으나, 철근 부식에 의한 콘크리트 구조물의 휨 강도 저하는 (Dong et al, 2017; Torres-Acosta et al, 2007; Yalciner et al, 2020)에 의해 보고된바 있다. 특히, Kallias and Rafiq 2010에 의해 부식전류밀도(corrosion current density)의 증가로 휨 강도가 현저히 감소됨이 밝혀졌다. 또한 최근 부식된 철근-콘크리트 구조물의 압축 변형률과 휨 모멘트 변화에 대한 실험적 연구 결과, 철근 부식으로 인해 압축 변형률과 휨 모멘트 모두 극단적으로 감소되었다(Andisheh et al, 2018). 이 밖에도 해석적 접근을 통해 철근 부식에 의한 부착강도(Hanjari et al, 2011; Lim et al, 2016) 및 전단 강도(Kordtabar and Dehestani 2021) 저하에 따른 연성(Ductility) 감소 등, 철근 부식이 콘크리트 구조물의 성능에 미치는 영향에 대한 연구는 충분히 수행되었으나, ECE 처리에 따른 구조물의 거동에 대한 연구는 부착강도에만 집중되어 있다.

콘크리트 구조물의 구조적 거동에 ECE 처리 효과를 반영하기 위해서 우선적으로 ECE 처리가 시멘트 매트릭스, 철근의 부동성(passivity) 그리고 계면 조건에 영향을 미칠 수 있다는 점을 고려해야만 한다. 철근 부식이 발생되면 철근 표면에 녹이 형성되어 유효 단면적은 감소되지만 총 면적은 팽창되고, 이로 인해 콘크리트에는 내부 응력이 발생된다. 이 내부응력은 부식 진행에 따라 증가 되어 철근-콘크리트 계면에 균열을 발생시키게 된다. 결과적으로 철근 부식이 지속되면 계면에 발생되었던 내부 균열은 콘크리트 표면까지 확산될 수 있다. ECE 처리는 기공 용액(Pore

solution)에 이온이 침전되어 기공 구조를 재구성 할 수 있다. 실제로 철근 표면에 생성된 녹은 콘크리트 내부에 존재하는 기공의 면적을 감소시킬 수 있으며, 상대적 작은 깊이의 균열은  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 같은 침전된 수화물에 의해 채워질 수 있다. 이를 통해 콘크리트의 강도(Strength)와 연성(Ductility)와 같은 콘크리트의 특성이 향상될 수 있다. 또한 부식 과정에서 콘크리트의 균열이 이미 발생되었을 수 있으나, 이 균열은 ECE에 의해 회복될 수 있다. 실제로 이러한 회복 정도는 균열의 정도와 ECE 조건(전류 밀도 및 처리기간)에 의해 결정되므로 철근-콘크리트 구조물의 거동은 부식 정도와 ECE 처리 수준에 따라 달라질 수 있다.

또한 ECE는 콘크리트 내 철근의 부식을 완화시켜 철근 표면에 형성된 녹을 제거할 수 있으며, 이 과정에서 콘크리트의 계면 영역을 더욱 개선할 수 있다. 또한, 철근 단면을 회복시켜 인장 변형에 대한 구조적 성능을 향상시켜 시킬 수 있다. 따라서 ECE 처리된 콘크리트 구조물은 외부하중에 대한 인장균열에 대한 저항력이 더 강화될 수 있다. 계면 영역은 철근과 콘크리트의 부착 상태와 밀접하게 연관되어 있으며, 더욱이 철근 부식에 의해 이 영역에서 우선적으로 균열이 발생된다. 이러한 이유로 철근과 콘크리트 사이의 계면을 개선하는 것은 구조적 거동에 매우 주요한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 계면 영역의 공극 채움 및 부식 방지 측면에서 ECE의 효과는 콘크리트 구조물의 구조적 성능을 예측하는 데 매우 중요한 요소이다.

#### 5. 결론

부식된 철근-콘크리트 시편에 ECE 처리를 완료한 후, 3점 재하 시험을 통해 콘크리트 구조물의 구조적 거동 특성을 평가했으며, 상기 실험적 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 8주간 ECE 처리를 통해 염화물 침투 형식(Type B) 시편들의 연성(Ductility)이 향상되었다. 철근이 부식되면 콘크리트 구조물의 강성(Stiffness)과 유연도(Flexibility)는 감소되지만 ECE 처리를 통해 구조물의 연성(Ductility)을 향상시켜 인장 균열에 대한 저항력을 높일 수 있었다.
2. 철근 부식은 수직 변위에 따른 최대 휨 모멘트를 증가시킨 반면, ECE 처리는 지속 시간 증가에 따라 최대 휨 모멘트를 감소시켰다. 즉, ECE 처리로 인해 구조물의 강성은 감소되었으나 강도는 증가되었다.
3. 미처리 시편과 ECE 처리된 시편의 수직 변위는 Control보다 항상 높게 나타났으며, ECE 처리 기간 증가에 따라 수직

변위 또한 증가했다. 이를 통해 ECE 처리는 콘크리트 구조물의 유연성을 높일 수 있음을 알 수 있었다. 또한 ECE 처리 기간에 따라 균열에 의한 단면 2차 모멘트의 감소율이 더 작아졌다. 이는 ECE 처리가 철근-콘크리트 구조물의 균열에 대한 저항능력을 향상시킴을 의미한다.

4. 8주간 ECE 처리된 시편을 제외하고, ECE 미처리 시편(철근이 부식된 시편)과 ECE 처리된 시편들의 최대 하중은 Control에 비해 크게 나타났다. 이는 부식으로 인한 철근과 콘크리트간 마찰력 증가에 기인된 것이며, 이 마찰력은 ECE 처리로 염화물이 추출됨에 따라 감소되는 것으로 판단된다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

이 논문은 2021년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(No. NRF-2020 R1A2C3012248). 이에 감사드립니다.

## References

- ACI 318-19. (2019). Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- ACI 365.1R-17. (2017). Report on Service Life Prediction, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- Andisheh, K., Scott, A., Palermo, A. (2018). Experimental evaluation of the residual compression strength and ultimate strain of chloride corrosion-induced damaged concrete, *Structural Concrete*, **20(1)**, 296-306.
- Azad, A.K., Ahmad, S., Azher, S.A. (2007). Residual strength of corrosion-damaged reinforced concrete beams, *ACI Materials Journal*, **104(1)**, 40-47.
- Dong, J., Zhao, Y., Wang, K., Jin, W. (2017). Crack propagation and flexural behaviour of RC beams under simultaneous sustained loading and steel corrosion, *Construction and Building Materials*, **151**, 208-219.
- Elgebaley, R., Elshazly, Y., Elsalamawy, M. (2019). Role of cement type on performance change of reinforcing steel due to chloride extraction, *Construction and Building Materials*, **208**, 444-453.
- Hanjari, K.Z., Kettil, P., Lundgren, K. (2011). Analysis of mechanical behavior of corroded reinforced concrete structures, *ACI Structural Journal*, **108(5)**, 532-541.
- Hwang, W., Ann, K.Y. (2023). Determination of rust formation to cracking at the steel-concrete interface in concrete, *Construction and Building Materials*, **367**, 130215.
- Ihekweba, N.M., Hope, B.B., Hansson, C.M. (1995). Pull-out and bond degradation of steel rebars in ECE concrete, *Cement and Concrete Research*, **26(2)**, 267-282.
- Kallias, A.N., Rafiq, M.I. (2010). Finite element investigation of the structural response of corroded RC beams, *Engineering Structures*, **32(9)**, 2984-2994.
- Kordtabar, B., Dehestani, M. (2021). Effect of corrosion in reinforced concrete frame components on pushover behavior and ductility of frame, *Structural Concrete*, **22(5)**, 2665-2687.
- Li, Y., Liu, X., Wu, M., Bai, W. (2017). Research of electrochemical chloride extraction and reinforcement of concrete column using MPC-bonded carbon fiber reinforced plastic sheet & mesh, *Construction and Building Materials*, **153**, 436-444.
- Lim, S., Akiyama, M., Frangopol, D.M. (2016). Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling, *Engineering Structures*, **127**, 189-205.
- Lin, H., Li, Y., Li, Y. (2019). A study on the deterioration of interfacial bonding properties of chloride-contaminated reinforced concrete after electrochemical chloride extraction treatment, *Construction and Building Materials*, **197**, 228-240.
- Liu, Y., Weyers, R.E. (1998). Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures, *ACI Materials Journal*, **95(6)**, 675-681.
- Reou, J.S., Ann, K.Y. (2010). The distribution of hydration products at the steel-concrete interface for concretes subjected to electrochemical treatment, *Corrosion Science*, **52(6)**, 2197-2205.
- Torres-Acosta, A.A., Navarro-Gutierrez, S., Teran-Guillén, J. (2007). Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, **29(6)**, 1145-1152.
- Vrable, J.B. (1977). Cathodic protection for reinforcing steel in concrete, *Chloride Corrosion of Steel in Concrete*, ASTM STP 629-EB, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 124-149.
- Vu, K., Stewart, M.G., Mullard, J. (2005). Corrosion-induced cracking: experimental data and predictive models, *ACI*



- Structural Journal, **102(5)**, 719–726.
- Yalciner, H., Kumbasaroglu, A. (2020). Experimental evaluation and modeling of corroded reinforced concrete columns, ACI Structural Journal, **117**, 61–76.
- Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., El-Sayed, A.K., Pekrioglu Balkis, A., Dogru, E., Turan, A.I., Karimi, A., Kohistani, R., Mermit, M.F., Bicer, K. (2020). Flexural strength of corroded reinforced concrete beams, ACI Structural Journal, **117(1)**, 29–41.
- Zhang, Q., Gong, J. (2013). Study on seismic behavior of reinforced concrete columns after ECE treatment, Construction and Building Materials, **50**, 549–559.

### 전기화학적 염화물 추출 후 철근-콘크리트 보의 휨 거동

본 연구에서는 전기화학적 염화물 추출(ECE) 완료된 RC 보의 구조적 거동을 기존에 주로 사용되었던 부착 강도 측정이 아닌 3점 재하 시험을 통해 분석했다. 그 결과, ECE 처리에 의해 콘크리트 보의 휨 강성은 저하되었으나, 최대하중 측면에서 강도는 향상되는 것으로 나타났다. 또한, ECE에 의해 인장 변형률이 증가하여 인장 균열에 대한 저항성은 향상되었으며, 관성 모멘트 감소율은 감소하였다. 이러한 구조적 거동 측면의 이점에도 불구하고 연성 및 휨 강성은 저하되었다. 콘크리트 보의 휨 강성은 선형 탄성 범위에서 유효 단면적의 손실로 인해 감소됐고, 실제로 인장변형에 의해 파손된 상태에서 단면 2차 모멘트는 약 70 %의 손실되었다. 그러나 이러한 단면 손실에 의한 관성 모멘트 감소율은 ECE에 의해 더 낮아졌는데, 이는 균열에 대한 저항성이 증가되는 반면, 변형량이 증가되어 사용성 측면에서의 위험성은 더 증가됨을 의미한다.