

## 철근 좌굴을 고려한 콘크리트 패널의 비선형 거동에 대한 해석

이상섭<sup>1\*</sup>, 박금성<sup>2</sup>, 배규웅<sup>3</sup>

## Analysis for Nonlinear Behavior of Concrete Panel Considering Steel Bar Buckling

Sang-Sup Lee<sup>1\*</sup>, Keum-Sung Park<sup>2</sup>, Kyu-Woong Bae<sup>3</sup>

**Abstract** : Many constitutive models for concrete have been developed to predict the nonlinear behavior of concrete members considerably. The constitutive model for reinforcing bar that include the tension stiffening effect due to the bond characteristics between steel bars and concrete is being studied but the bilinear model is generally used. It was found that the buckling of the longitudinal reinforcing bars is controlled the nonlinear behavior of hybrid precast concrete panel, which is being developed for core wall. In this study, the constitutive models that can consider the embedding and buckling effects of reinforcing bar are investigated and a new model combing these constitutive models is proposed. In order to verify the proposed model, the analysis results are compared with experimental results of the concrete wall and hybrid precast concrete panel. The analysis of embedding-effect-only modeling predicted that the deformation increases continually without the decrease in the load carrying capacity. However, the analysis results of proposed model showed good agreement with some experimental results, thus verifying the proposed computational model.

**Keywords** : Average stress-strain relations of embedded bar, Steel bar buckling, Nonlinear analysis, Dilation angle

### 1. 서 론

철근콘크리트 부재의 비선형 거동을 모사하기 위해 해석 대상 규모와 목적에 따라 미시적 해석 모델과 거시적 해석 모델의 수치 해석법으로 발전해 왔다. 해석의 정밀도를 높이기 위해 실험을 통해 여러 응력 상태에서 관찰된 현상과 효과를 반영할 수 있는 모델이 제안되어 왔으나 부재의 전체적인 비탄성 거동을 나타내기 위해 재료의 응력도-변형도 관계를 정의하는 구성모델의 기능에 전적으로 의존하고 있다. 콘크리트 소성 모델은 등방성 재료의 가정 하에서 소성이론에 따른 파괴기준을 중심으로 모델이 제안되어 주로 압축거동을 나타내는데 사용되었으며, 미세균열의 확산에 의한 비선형 거동과 강성 저하를 고려한 손상 모델이 결합된 소성 손상 모델은 단조, 반복, 동적 하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 해석에 사용되어 왔다. 이와 같이 콘크리트 재료 구성모델은 상대적으로 많은 연구를 통해 부재의 비선형 거동을 정확히 예측할 수 있도록 개선되어 왔다. 철근에 대한 구성모델은 전형적으로 완전탄소성이나 이선형 변형도 경화 관계가 대표적이며

철근과 콘크리트의 부착 효과에 따른 인장 강화 현상이 반영된 모델이 연구되고 있다. 철근콘크리트 부재의 항복 이후 거동은 주로 길이방향 철근의 좌굴 및 횡방향 철근으로 둘러싸인 콘크리트의 구속 효과의 영향을 받는다(Kunnath et al., 2009). 노출 철근의 좌굴 거동에 대한 실험 연구를 통해 매입 철근의 좌굴 모델(Monti and Nuti, 1992; Rodriguez et al., 1999)이 제안되었으며, 이론과 해석을 통한 매입 철근의 좌굴 모델(Dhakal and Maekawa, 2002)도 제안되었고 최근 이 모델을 바탕으로 FRP로 구속된 콘크리트에 매입된 철근의 좌굴 모델(Bai et al., 2017)을 개선하여 제시하였다.

복합 프리캐스트 콘크리트(이하 PC) 패널은 모듈러 건축물의 콘크리트 코어의 습식 공사를 최소화하여 모듈 적층과 동시에 시공될 수 있도록 고안된 건식 접합 PC 벽체이다. 천장보와 바닥보가 만나는 층간대에서 접합되는 박스형 골조식 모듈의 특징을 살려 복합 PC 패널도 PC 벽체 상하부에 강재보를 설치하여 볼트로 접합될 수 있도록 설계되었으며, 형상 및 소재 구성은 선행연구(Lee and Park, 2017)에 서술하였다. 선행연구에서는 철근콘크리트 벽체와 복합 PC 패널의 해석 결과를 비교하여 복합 PC 패널의 상세를 보완하였고, 반복 가력 실험을 통해 수직철근의 좌굴 등으로 내력과 항복 이후 거동이 선행연구의 해석결과와 큰 차이가 있음을 확인하였다. 이에 이 연구에서는 실험을 통해 확인된 콘크리트 패널의 비선형 거동을 Abaqus를 통해 해석적으로 모사하기 위해 균열 발생 콘크리트에서 철근의 평균 응력과 매입 철근의 좌굴이

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원, 공학박사, 연구위원

<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원, 공학박사, 연구위원

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원, 공학박사, 선임연구위원

\*Corresponding author: lss0371@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

• 본 논문에 대한 토의를 2018년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

고려된 재료 모델을 제시하고 해석결과와 실험결과를 비교하여 제시한 모델의 타당성을 검증하고자 한다.

## 2. 비선형 거동의 영향 인자

### 2.1 콘크리트의 구성 모델

콘크리트는 취성적이지만 응력 역전 상태에서 인장 균열이 닫혀 하중을 전달하는 거동을 보인다. 반면 철근은 연성적이지만 응력 역전으로 파단 부위가 다시 결합되어 하중을 전달하지는 못한다. 따라서 콘크리트의 거동은 손상 모델이 적절하고, 철근의 거동은 소성 모델이 적합하다. 그러나 철근으로 보강된 콘크리트는 연성 거동 효과가 추가되기 때문에 철근 콘크리트 구조물의 콘크리트 거동은 손상과 소성이 합쳐진 손상 소성(damaged plasticity) 모델로 보다 잘 표현할 수 있어 이 연구에 사용되었다. 이 모델은 인장 균열 및 압축 압괴를 보이는 파괴 모드를 재현하는데 적절하다(Alfarah et al., 2017). 이 모델은 비상관 소성 흐름 법칙(non-associated flow rule)이 적용되어 항복면(yield surface)과 유동 포텐셜(flow potential)이 같지 않으며, 유동 포텐셜은 팽창각(dilation angle)의 함수로 콘크리트의 팽창각은 약 15°에서 55°의 값을 가지는 것으로 알려져 있어 여기서는 내부 마찰각과 동일한 값인 31° 이외에 20°와 25°를 해석에 사용하였다. 콘크리트의 압축 응력도-변형도 관계는 식 (1a)의 Saenz(1964) 모델로 압축강도에 해당하는 변형도는 0.0025로 가정되었다. 콘크리트의 인장 응력도-변형도 관계는 식 (1b)의 Belarbi and Hsu(1994) 모델이 사용되었으며 이를 Fig. 1에 나타내었다.

$$f_{cc} = \frac{E_c \varepsilon}{1 + (R + R_E - 2) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}\right) - (2R - 1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}\right)^2 + R \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}\right)^3} \quad (1a)$$

$$f_d = f_{cr} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_c}\right)^{0.4} \quad (1b)$$

$$\text{여기서, } R = \frac{R_E(R_o - 1)}{(R_E - 1)^2} - \frac{1}{R_e}$$

$$R_E = E_c / E_o, \quad R_o = f_{ck} / \sigma_f, \quad R_e = \varepsilon_f / \varepsilon_o$$

$$E_o = f_{ck} / \varepsilon_o$$

$$f_{cr} = 0.31 \sqrt{f_{ck}}$$

### 2.2 매입 철근의 구성 모델

콘크리트에 매입되지 않고 일축 인장을 받는 철근의 응력도-변형도 관계는 Fig. 2(a)에 나타난 것과 같이 탄성, 항복, 변형도 경화 구간으로 구분되는 특징을 보인다. 강도가 증가하

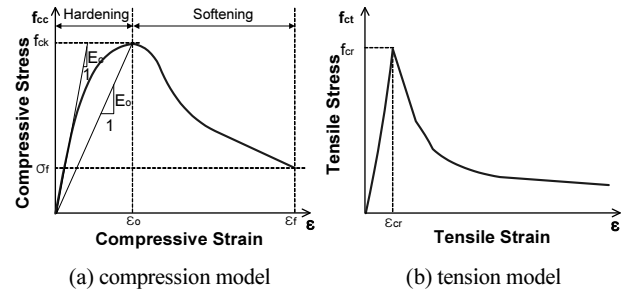


Fig. 1 Stress-strain curves of concrete

거나 성분이 달라질 경우 항복구간이 명확히 나타나지 않는 경우도 있지만 탄성계수가 일정하고 탄성한계가 항복강도 부근이기 때문에 식 (2)와 같이 완전 탄소성 모델로 가정된다.

$$f_s = E_s \varepsilon_s, \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad (2a)$$

$$f_s = f_y, \quad \varepsilon_s > \varepsilon_y \quad (2b)$$

그러나 콘크리트에 매입된 철근의 경우 균열이 발생한 경우 변형도 경화까지 겪을 수 있지만 균열 사이에서 응력은 일정하지 않고 부착응력도 변화한다. 이런 영향으로 콘크리트에 매입된 철근은 순수 철근의 항복구간이 나타나지 않고 항복강도보다 작은 응력에서 항복이 시작되어 변형경화 시점 또는 인장강도까지 강성이 유지되는 평균 응력도-변형도 관계로 표현된다.

$$f_{s,em} = E_s \varepsilon_{s,em}, \quad \varepsilon_{s,em} \leq \varepsilon_y' \quad (3a)$$

$$f_{s,em} = (0.91 - 2B)f_y' + (0.02 + 0.25B)E_s \varepsilon_{s,em}, \quad \varepsilon_{s,em} > \varepsilon_y' \quad (3b)$$

$$\text{여기서, } B = \frac{1}{\rho} \left(\frac{f_{cr}}{f_y}\right)^{1.5}$$

$$f_y' = (0.93 - 2B)f_y, \quad \varepsilon_y' = f_y' / E_s$$

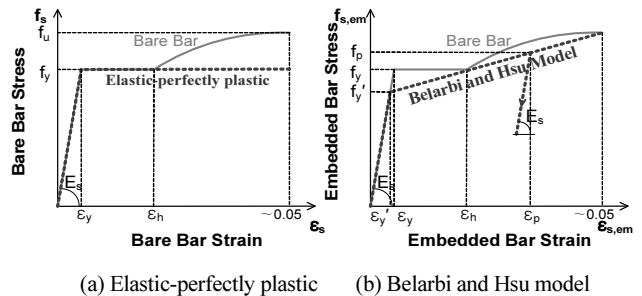


Fig. 2 Stress-strain curves of steel bar

Belarbi and Hsu(1994)는 매입 철근의 거동이 철근의 항복강도, 철근비 및 콘크리트 인장강도에 직접적으로 관련이 있

음을 규명하였다(Hsu and Mo, 2010). 이 연구에서 사용된 매입 철근의 평균 응력도-변형도 관계는 Belarbi and Hsu(1994)의 모델로 식 (3)과 같으며 Fig. 2(b)에 도식화하였다.

### 2.3 매입 철근의 좌굴

철근콘크리트 구조물의 항복 이후 거동은 콘크리트에 발생한 균열과 국부적 압괴로 노출된 길이방향 철근이 압축을 받아 횡방향 철근의 지지거리 사이에서 좌굴하여 연화되는 현상을 보이게 된다. 이러한 철근콘크리트 구조물의 항복 이후 연화 거동은 길이방향 철근이 일정 압축력 하에서 휨을 받는 기둥이나 벽체에서 쉽게 관찰된다.

매입 철근의 좌굴 모델은 기하학적 불안전성으로 고려하기 보다 실험을 통해 관찰된 좌굴의 영향을 재료 응답에 포함시키는 것이 일반적이다. 매입 철근의 좌굴모델은 특정 측정 길이에 걸친 평균 응력과 변형도 응답으로 유도되었기 때문에 실제 재료 모델로 고려될 수는 없지만 이런 접근법이 아주 정확하지 않더라도 철근의 좌굴 반응을 포함시키는 데는 가장 실용적이고 효과적이다(Kunnath et al, 2009).

이 연구에서는 매입 철근의 좌굴모델로 변수 해석을 통해 개발된 Dhakal and Maekawa(2002)의 제안식을 검토하였다. 이 모델에서 평균 압축 응력도-변형도 관계는 철근의 세장비와 항복강도의 제곱근으로 표현되며, 평균 압축 응력은 좌굴이 시작된 후 미매입 철근의 응력보다 작아지고 평균 응력도의 저하 시점은 미매입 철근의 응력도-변형도 관계에서 결정된다. 좌굴 이후 평균 응력도-변형도 곡선은 탄성계수의 -2%의 기울기로 항복 강도의 20%까지 떨어진 후 일정하게 유지된다.

$$f_{s,bk} = E_s \varepsilon_{s,bk}, \quad \varepsilon_{s,bk} \leq \varepsilon_y' \quad (4a)$$

$$\frac{f_{s,bk}}{f_s} = 1 - \left(1 - \frac{f_{s,bk}^*}{f_s^*}\right) \left(\frac{\varepsilon_{s,bk} - \varepsilon_y}{\varepsilon^* - \varepsilon_y}\right), \quad \varepsilon_y < \varepsilon_{s,bk} \leq \varepsilon^* \quad (4b)$$

$$f_{s,bk} = f_{s,bk}^* - 0.02E_s(\varepsilon_{s,bk} - \varepsilon^*) \geq 0.2f_y, \quad \varepsilon_{s,bk} > \varepsilon^* \quad (4c)$$

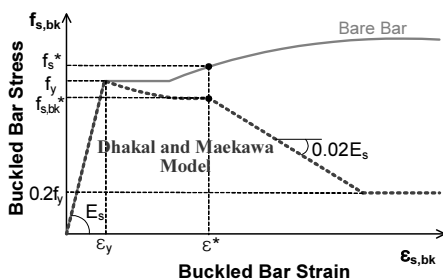


Fig. 3 Stress-strain curve of buckled steel bar

Dhakal and Maekawa(2002)의 매입 철근 좌굴 모델은 식 (4)와 같이 3개 부분으로 구분할 수 있으며 평균 응력도-변형도

관계의 대표적인 형태는 Fig. 3과 같다. 평균 응력도-변형도 곡선에서 항복 이후 성능 저하의 거동은 중간 지점( $\varepsilon^*, f_{s,bk}^*$ )의 정의를 통해 전개되며 중간 지점의 변형도와 응력도는 식 (5)와 식 (6)으로 각각 구할 수 있다.

$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_y} = 55 - 2.3 \sqrt{\frac{f_y}{100} \frac{L}{D}}, \quad \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_y} \geq 7 \quad (5)$$

$$\frac{f_{s,bk}^*}{f_s^*} = \alpha \left(1.1 - 0.016 \sqrt{\frac{f_y}{100} \frac{L}{D}}\right), \quad f_{s,bk}^* \geq 0.2f_y \quad (6)$$

중간 지점의 변형도와 응력도는 횡방향 철근으로 지지되는 길이방향 철근의 길이(L)를 철근의 직경(D)으로 나눈 세장비(L/D)와 변형도 경화 거동을 고려하기 위한 응답수정계수( $\alpha$ )를 통해 구할 수 있다. 응답수정계수( $\alpha$ )는 완전 탄소성 거동일 경우 0.75를 적용하고, 선형 경화 거동일 경우 1.0을 적용한다. 따라서 실제 철근의 경우 0.75와 1.0 사이에서 선택되어야 하지만 항복비가 작은 고강도 철근의 경우 0.75에 가까운 값을 선택하는 것이 바람직하다.

## 3. 콘크리트 패널의 실험

### 3.1 실험 계획

15층 규모 모듈러 건축물의 코어 벽체로 이용하기 위해 횡력저항성능을 평가하고자 복합 PC 패널과 콘크리트 벽체의 비교 실험을 계획하였다. 문헌조사를 통해 실험체가 휨과 전단의 영향을 받을 수 있도록 형상비를 2에 맞춰 크기를 계획하였고 복합 PC 패널은 볼트로 접합되는 하부층 천장보까지 제작되도록 고려하였다.

이에 따라 콘크리트 벽체 실험체 크기는 길이 1,480mm, 높이 3,125mm, 두께 200mm로 형상비가 약 2.1이 되고, 복합 PC 패널 실험체는 높이 2,915mm로 형상비가 약 1.97이 되지만 볼트로 체결된 수평접합부까지 포함한 전체 높이는 콘크리트 벽체 실험체와 동일하게 제작되었다. SD500 D13 철근을 이용하여 수직철근비( $\rho_v$ )가 0.634%, 수평철근비( $\rho_h$ )는 0.422%가 되도록 배근하였으며, 수평철근의 양단부에는 U형 철근으로 보강하였다. C형강은 두께 6mm인 SS235 강판을 웨브 200mm, 플랜지 75mm로 절곡 성형되었으며, 쌍으로 설치되어 마주 보게 되는 C형강의 웨브에는 50×40mm의 강재 링크 2개를 수직철근 간격으로 용접하였다. 수평접합부는 층간대에서 만나는 C형강 사이에 1480×200×9mm 크기의 강판을 삽입하고, F10T M20 고력볼트를 100mm 간격으로 체결하여 완성하였다. 콘크리트 벽체 실험체의 수직철근은 베이스와 가력보에 정착시킨 반면 복합 PC 패널 실험체의 수직철근은 단부

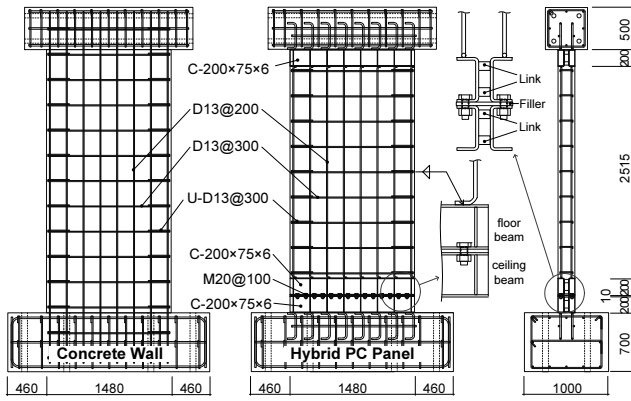


Fig. 4 Details of test specimens

에 길이 약 80mm인 90도 갈고리를 가공하여 C형강 플랜지에 용접하여 정착시켰다. 실험체 형상은 Fig. 4에 나타내었고 사용 재료의 시험결과는 Table 1과 Table 2에 정리하였다.

### 3.2 실험 방법

실험은 일정 축력 하에서 횡방향으로 점증 진폭 반복 가력하는 방법이 사용되었다. 축하중은 콘크리트 벽체 실험체 단면의 공칭축강도( $P_n$ )의 10%인 429kN을 2대의 액추에이터를 이용해 실험이 종료될 때까지 일정하게 유지되도록 가하였다. 횡방향 하중은 가력보에 연결된 액추에이터를 이용해 ACI ITG-5.1-07에 제시된 가력 스케줄을 따라  $\pm 0.25, \pm 0.50, \pm 0.75, \pm 1.00, \pm 1.50, \pm 2.00, \pm 2.50, \pm 3.50, \pm 5.00, \pm 6.00\%$ 의 순서로 각 횡변위각( $\theta$ )에서 3 사이클씩을 반복되도록 변위제어 방식으로 가하였다. 실험체 셋팅 방법과 가력 스케줄은 Fig. 5에 함께 나타내었다.

### 3.3 실험 결과

실험을 통해 측정된 하중-변위 관계를 Fig. 6에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of concrete

Specimen	$f_{ck\_design}$ (MPa)	Age (day)	$f_{ck\_Test}$ (MPa)			$f_{ck\_average}$ (MPa)
RC Wall	24	28	27.5	27.3	26.6	27.1
H-PC Panel	24	29	26.7	26.0	26.4	26.4

Table 2 Mechanical properties of steel

Specimen	$f_{y\_design}$ (MPa)	$f_{y\_test}$ (MPa)			$f_{u\_test}$ (MPa)		
Rebar D13	500	621	601	625	690	685	701
		$f_{y\_average} = 616$			$f_{u\_average} = 692$		
Plate 6mm	235	357	354	330	507	500	485
		$f_{y\_average} = 347$			$f_{u\_average} = 497$		

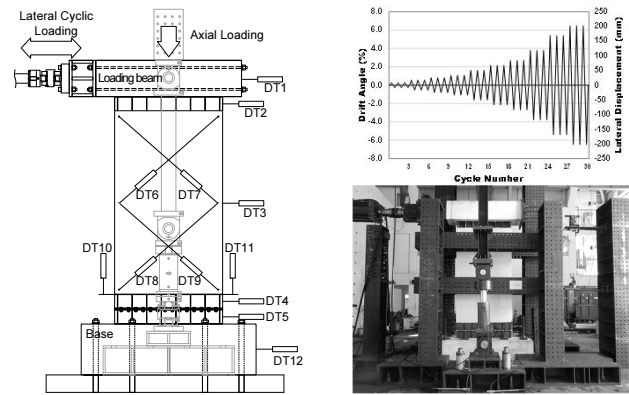


Fig. 5 Test set-up and loading schedule

복합 PC 패널의 최대하중은 +241kN(-220kN)이었고, 콘크리트 벽체의 최대하중 +329kN(-308kN)으로 측정되었다. 복합 PC 패널의 횡력저항성능이 떨어지는 이유는 C형강과 콘크리트가 분리되고 C형강과 C형강의 볼트 집합부가 벌어지기 때문인 것으로 관찰되었다. 그런데 Fig.7에서 확인할 수 있듯이 두 실험체 모두 공통적으로 콘크리트에 균열 발생과 함께 압축을 받는 수직철근이 좌굴되고 파단되어 비교적 작은 횡변위각에서 최대하중이 결정된 후 하중이 감소하는 거동을 보이고 있다.

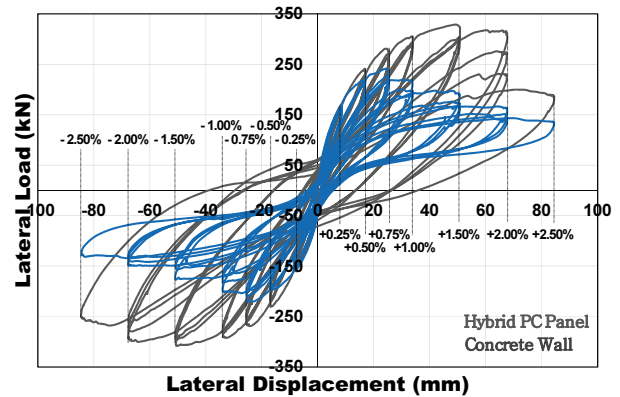


Fig. 6 Lateral load-displacement response

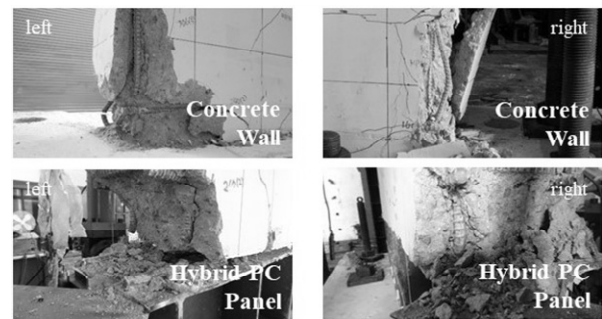


Fig. 7 Damage at toe of each specimens

## 4. 콘크리트 패널의 해석

### 4.1 좌굴 고려 매입 철근의 재료 모델 제안

매입 영향을 고려한 Belarbi and Hsu(1994) 모델은 평균 항복강도에서 항복을 시작하여 일정하게 강성이 유지되기 때문에 콘크리트가 파괴되더라도 내력이 유지되는 거동을 예측하게 된다. Dhakal and Maekawa(2002) 모델은 좌굴의 영향을 고려하고 있지만 철근이 항복강도에 도달한 다음 좌굴하기 시작하므로 인장을 받아 콘크리트에 균열이 발생한 부재의 강성 저하 시점이 늦어지는 거동을 보이게 된다.

상대적으로 철근비가 작고 횡방향 철근의 구속 간격이 큰 벽체에서 실제 항복강도보다 작은 응력에서 항복이 시작되어 좌굴하는 거동을 보이기 쉽다. 이와 같은 거동은 콘크리트 패널 실험을 통해 확인하였고 매입 철근의 좌굴 거동을 해석적으로 재현하기 위해 2장에 서술한 매입 영향과 좌굴 거동을 모두 고려할 수 있도록 매입 철근의 구성 모델을 식 (7)과 같이 재구성하여 제안하였다.

$$f_{s,cb} = E_s \varepsilon_{s,cb}, \quad \varepsilon_{s,cb} \leq \varepsilon_y' \quad (7a)$$

$$f_{s,cb} = (0.91 - 2B)f_y' + (0.02 + 0.25B)E_s \varepsilon_{s,cb} \leq f_y, \quad \varepsilon_y' < \varepsilon_{s,cb} \leq \varepsilon_k \quad (7b)$$

$$\frac{f_{s,cb}}{f_s} = 1 - \left(1 - \frac{f_{s,bk}^*}{f_s^*}\right) \left(\frac{\varepsilon_{s,cb} - \varepsilon_k}{\varepsilon^* - \varepsilon_k}\right), \quad \varepsilon_k < \varepsilon_{s,cb} \leq \varepsilon^* \quad (7c)$$

$$f_{s,cb} = f_{s,bk}^* - 0.02E_s(\varepsilon_{s,cb} - \varepsilon^*) \geq 0.2f_y, \quad \varepsilon_{s,cb} > \varepsilon^* \quad (7d)$$

$$\text{여기서, } \varepsilon_k = \frac{f_y - (0.91 - 2B)f_y'}{(0.02 + 0.25B)E_s}$$

제안한 매입 철근의 좌굴 모델은 Fig. 8에 나타내었다. 복합 PC 패널 실험체의 재료 강도 및 기하학적 조건에 따르고 완전 탄소성 거동을 가정( $\alpha = 0.75$ )하였을 때 항복이 시작되는 시점의 변형도와 응력은( $\varepsilon_y', f_y'$ )은 0.00308과 547MPa로 계산되었고, 좌굴이 시작되는 변형도( $\varepsilon_k$ )는 0.0161이었으며, 중간 지점의 변형도와 응력도( $\varepsilon^*, f_{s,bk}^*$ )는 0.0898과 433MPa로 계산되었다.

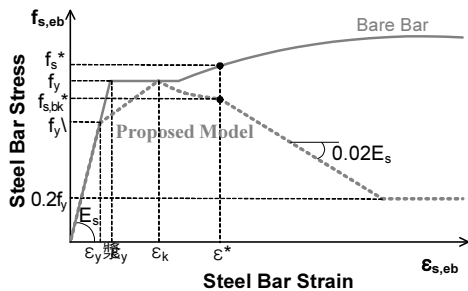


Fig. 8 Proposed stress-strain curve of steel bar

### 4.2 메쉬 민감도

콘크리트 벽체 모델링의 기하학적 조건 및 재료 강도는 실험 조건과 동일하였고, 밀면이 고정된 상태에서 윗면에 횡변위를 가하는 해석 조건으로 메쉬 민감도 분석을 수행하였다. 콘크리트의 구성모델은 압축에 대해 Saenz(1964) 모델이 사용되었고, 인장에 대해 Belarbi and Hsu(1994) 모델이 사용되었다. 철근의 재료구성모델은 매입 효과만 고려된 Belarbi and Hsu(1994) 모델이 항복강도까지 입력되었다. 콘크리트는 C3D8R 솔리드 요소가 적용되었고 철근은 T3D2 트러스 요소로 콘크리트에 임베디드(embedded) 조건으로 모델링되었다. 먼저 철근 요소크기가 50mm인 상태에서 콘크리트 요소크기를 100mm, 70mm, 50mm로 분할하여 해석 결과를 Fig. 9에 비교하였고 콘크리트 요소크기를 50mm로 하고 철근 요소크기를 100mm, 70mm, 50mm로 분할하여 해석한 결과를 Fig. 10에 비교하였다. 콘크리트 요소 크기가 작을수록 최대하중이 커지는 경향을 보이고 있으며, 요소 크기가 70mm 이상인 경우 항복 이후 수렴이 원활하지 못해 곡선이 떨리는 현상을 보이고 있다. 임베디드 철근은 요소 크기에 따른 의미 있는 결과는 보이지 않아 콘크리트와 철근 모두 요소 크기를 50mm 이하로 하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

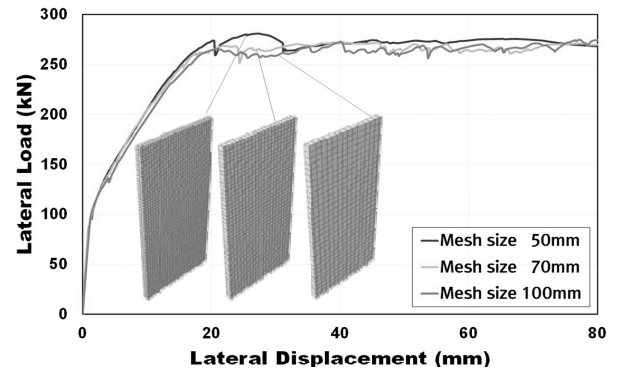


Fig. 9 Effect of mesh discretization for concrete

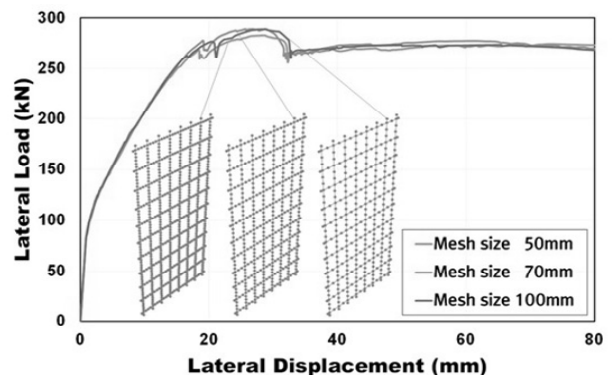


Fig. 10 Effect of mesh discretization for steel bar



### 4.3 복합 PC 패널의 모델링

복합 PC 패널의 비선형 거동을 해석하기 위해 앞서 분석한 결과를 바탕으로 Fig. 11과 같이 모델링하였고, 철근콘크리트 벽체는 베이스를 포함하여 동일 조건으로 모델링하였다. 해석 시간 단축을 위해 YZ 평면에 대칭인 1/2 모델이 사용되었고, 실험체에 함께 제작된 베이스와 가력보는 생략하였다.

콘크리트의 구성모델은 압축에 대해 Saenz(1964) 모델이 사용되었고, 인장에 대해 Belarbi and Hsu(1994) 모델이 사용되었다. 철근의 구성모델은 식 (7)의 매입 및 좌굴 효과를 동시에 고려할 수 있도록 제안한 모델을 사용하였고 C형강 및 강판의 구성모델은 완전탄소성 모델이 적용되었다.

구성 요소 사이에 상호 맞닿는 부분은 접촉(contact) 조건이 부여되었기 때문에 수렴이 원활하도록 마스터 요소 표면보다 슬레이브 요소 표면을 더 작게 분할하였다. 콘크리트 부분은 C3D8R 솔리드 요소를 적용하여 약 40mm 크기의 메쉬로 나뉘었고, 철근 부분은 T3D2 트러스 요소를 적용하고 약 40mm 크기의 메쉬로 분할하였다. C형강 및 강판 부분은 C3D8R 솔리드 요소를 적용하고 약 12mm 크기로 분할하였고, 볼트 부분도 C3D8R 솔리드 요소를 사용하고 약 6mm 크기로 나누었다. C형강의 실제 표면 상태를 감안하여 콘크리트와 C형강이 접촉하는 부분은 0.1의 마찰계수를 입력하고 하드 콘택 특성을 가정하였고, 볼트와 C형강이 맞닿거나 C형강과 접합 강판이 맞닿는 부분의 마찰계수는 0.3을 가정하였다. 볼트와 C형강의 접촉은 법선방향 거동과 접선방향 거동으로 나눠 각각 하드 콘택과 페널티(penalty) 접촉 특성으로 가정하였다.

고력볼트 체결력은 F10T M20의 표준볼트장력 182kN을 몸통 중앙면에 프리텐션으로 입력하는 방법으로 입력하거나 표준볼트장력을 2개의 볼트가 담당하고 있는 면적으로 나누 값을 압력으로 입력하는 방법이 사용되었다. 또한 실험체에 가해진 축력의 1/2 하중을 상부면에 압력으로 가해지도록 입력하였고, 하부면을 고정된 상태에서 상부면에 약 80mm의 수평변위를 가하여 단조 가력 해석을 실시하였다.

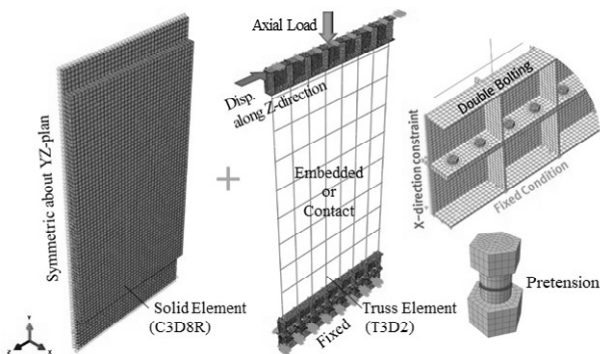


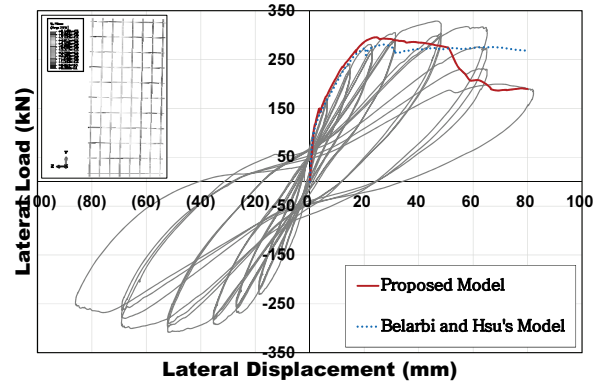
Fig. 11 Modeling of hybrid precast concrete panel

## 5. 해석 결과의 비교·분석

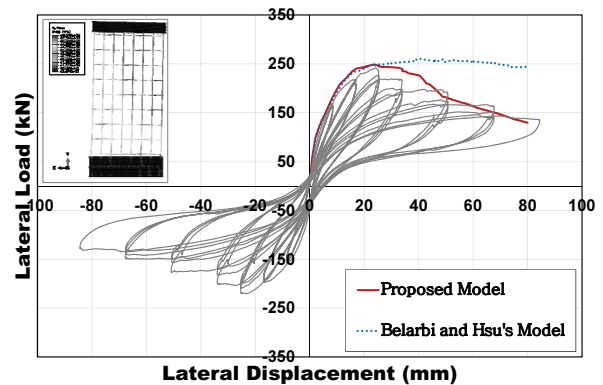
### 5.1 해석결과와 실험결과와의 비교

철근의 좌굴 효과를 고려한 제안 모델과 고려하지 않은 모델의 해석결과를 콘크리트 벽체와 복합 PC 패널의 실험결과와 비교할 수 있도록 Fig. 12에 나타내었다. 비교에 사용된 해석결과는 콘크리트 손상 소성 모델의 변수 가운데 팽창각을 20°로 입력하고 유동 포텐셜 편심 등의 나머지 변수는 기본 설정으로 입력하여 얻은 결과이다.

콘크리트 벽체의 경우 해석결과는 네 번째 변위각까지는 실험결과와 좋은 대응을 보이고 있으나 다섯 번째 변위각 이후 다소 차이가 다소 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 차이는 베이스와 가력보가 일체로 제작된 실험체에 비록 수평방향으로 가력을 하였지만 가력 장치의 헤드가 회전하면서 해석에서와 같이 정확히 수평방향으로만 변위가 가해지는 것이 아니기 때문일 것으로 추정된다. 반면 복합 PC 패널의 경우 철근 좌굴을 고려한 제안 모델의 해석결과는 실험결과와 좋은 대응을 보이고 있다. 이것은 C형강과 콘크리트가 분리되면서 콘크리트 벽체보다 수평 가력이 좀 더 유지되었기 때문으로 판단된다.



(a) Reinforced concrete wall



(b) Hybrid precast concrete panel

Fig. 12 Comparison of test results and analysis results

매입 철근의 좌굴이 고려되지 못한 모델을 사용한 해석 결과는 항복 이후 하중의 감소 없이 유지되는 거동을 공통적으로 예측하고 있지만 제안 모델은 항복 이후 하중의 감소를 보여주고 있어 벽체의 거동을 예상하는 재료 모델로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 비록 철근을 T3D2 트러스 요소로 모델링하여 철근의 좌굴까지 모사할 수 없었으나 이를 모사하기 위해 철근을 6개의 자유도를 갖는 B31 등의 보 요소를 감차적분하는 C3D8R 솔리드 요소에 임베디드 조건으로 적용할 경우 해석과정에서 수렴이 원활하지 않아 에러가 발생하거나 해석 시간이 길어지는 현상을 확인하였다.

## 5.2 팽창각에 따른 해석결과 비교

콘크리트와 같은 취성재료는 비탄성 변형률에 따른 체적 변화가 일어나는데 해석에 사용된 손상 소성 모델에서 이를 팽창각으로 표현한다. 마찰이 일어나는 재료에서는 이를 재료 변수로 약 15°에서 55°의 값 사이에서 입력하며 일반적으로 31°를 많이 적용하고 있다. 여기서는 팽창각을 20°, 25°, 31°로 가정한 경우의 해석결과의 변화 추이를 살펴보고자 동일한 조건 하에서 콘크리트 벽체와 복합 PC 패널에 대해 실시하였다. Fig. 13에 팽창각 변화에 따른 해석결과를 비교하였고 고 Fig. 14에 콘크리트의 응력분포를 나타내었다.

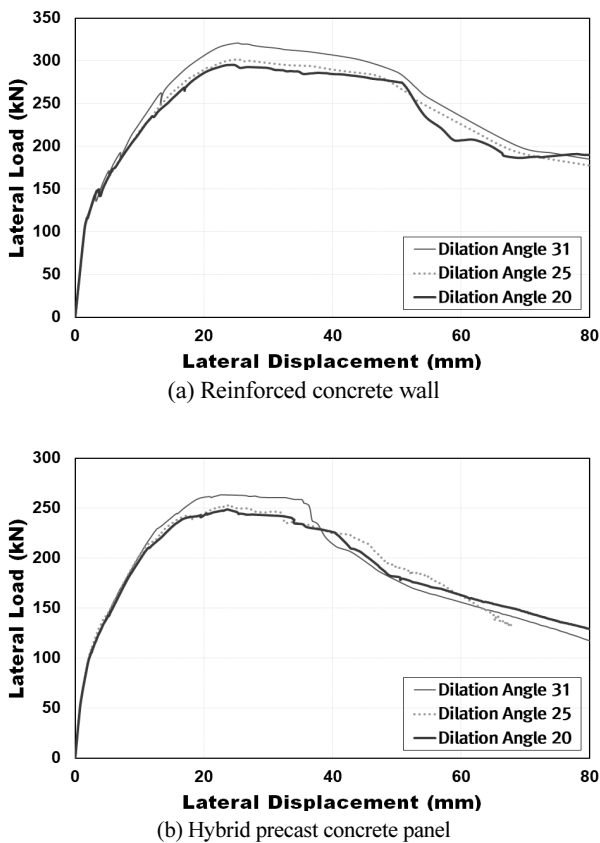


Fig. 13 Effect of dilation angle on lateral behavior

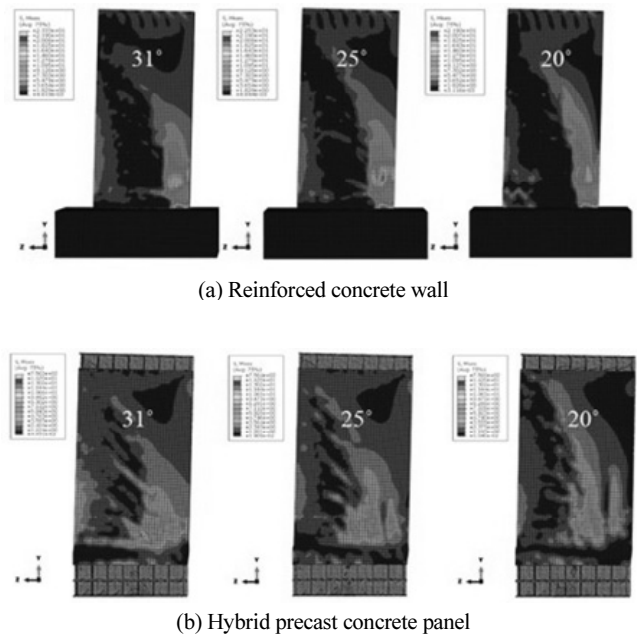


Fig. 14 Stress distribution of concrete according to dilation angle

Fig. 13에서 팽창각이 20°와 25°는 유사한 거동을 보이고 있지만 31°는 초기강성은 비슷하지만 최대하중이 증가하는 현상을 보이고 있다. Fig. 12에서 실험결과와 비교한 해석결과는 팽창각을 20°로 입력하여 얻은 것이다. 콘크리트 벽체의 경우 팽창각을 31°로 가정하면 최대하중에 대한 오차는 줄어들 수 있지만 항복 구간에서 거동 차이가 커지게 된다. 따라서 콘크리트 벽체와 복합 PC 패널의 해석에서 팽창각은 20° 또는 25°를 입력하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 한편 Fig. 14에 비교한 콘크리트의 응력분포는 팽창각이 20°인 해석결과에서 확인된 최대응력을 25°와 31°에서 최대치로 제한하여 얻은 것으로 팽창각이 작을수록 응력분포는 압축을 받는 우측 하단 부근을 중심으로 좌측 상단의 대각선 방향으로 확대되는 경향을 보이고 있다. 전단 변형에 대한 부피 증가율인 팽창각은 콘크리트 벽체에서 내부마찰각 31°보다 작은 값을 입력하는 것이 타당함을 알 수 있다.

## 6. 결론

압축을 받는 매입 수직철근의 좌굴에 따른 콘크리트 패널의 항복 이후 비선형 거동을 해석적으로 예측하기 위해 적절한 콘크리트 재료 모델과 철근의 재료모델이 필요하다.

이 연구에서 콘크리트의 재료구성모델은 손상 소성 모델이 적용되어 압축 응력도-변형도 관계는 Saenz(1964) 모델로, 인장 응력도-변형도 관계는 Belarbi and Hsu(1994) 모델이 사용되었다. 또한 철근의 구성모델은 Belarbi and Hsu(1994) 모델

과 Dhakal and Maekawa(2002) 모델을 재구성하여 매입과 좌굴에 의한 영향을 고려할 수 있는 모델을 제시하였다.

제안한 모델의 타당성을 검증하기 위해 해석결과를 실험결과와 비교한 결과 콘크리트 패널의 전체적인 거동 예측이 가능할 것으로 나타났다. 구체적으로 콘크리트 벽체의 경우 해석결과가 실험결과와 차이가 있었지만 제안한 모델의 적용으로 하중이 감소하는 비선형 거동을 표현할 수 있었다. 또한 복합 PC 패널의 경우 해석결과와 실험결과가 좋은 대응을 보여 비선형 거동을 비교적 정확히 예측할 수 있었다. 한편 콘크리트 손상 소성 모델의 재료 변수인 팽창각은 20°~25°가 적절한 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 주거환경연구사업(과제번호: 18RERP-B082884-05)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. ABAQUS(2014), Abaqus Analysis User's Guide 6.14, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA
2. Alfarah, B., Lopez-Almansa, F. and Oller, S.(2017), New methodology for calculating damage variables evolution in plastic damage model for RC structures, *Engineering Structures*, Elsevier, 132, 70-86.
3. Bai Y. L., Dai, J. G., Ozbakkaloglu T.(2017), Cyclic stress-strain model incorporating buckling effect for steel reinforcing bars embedded in FRP-confined concrete, *Composite Structures*, Elsevier, 182, 54-66.
4. Belarbi, A., and Hsu, T. T. C.(1994), Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete, *ACI Structural Journal*, ACI, 91(4), 465-474.
5. Dhakal, R., and Maekawa, K.(2002), Modeling for postyield buckling of reinforcement, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 128(9), 1139-1147.
6. Hsu, T. T. C and Mo, Y. L.(2010). Unified theory of concrete structures, 2nd edition, John Wiley & Sons Inc.
7. Kunnath, S. K., Heo, Y. and Mohle, J. F. (2009), Nonlinear uniaxial material model for reinforcing steel bars, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 135(4), 335-343.
8. Lee, S. S., Park, K. S.(2017), Development of hybrid panel with C-shaped steel beam at top and bottom of precast concrete wall, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, 29(6), 435-442.
9. Monti, G., and Nuti, C.(1992), Nonlinear cyclic behavior of reinforcing bars including buckling, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 118(12), 3268-3284.
10. Rodriguez, M., Botero, J., and Villa, J.(1999), Cyclic stress-strain behavior of reinforcing steel including effect of buckling, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 125(6), 605-612.
11. Saenz, L. P. (1964), Discussion of 'Equation for the stress-strain curve of concrete' by P. Desayi, and S. Krishnan, *Journal of the American Concrete Institute*, ACI, 61, 1229-1235.

Received : 09/14/2018

Revised : 09/23/2018

Accepted : 10/24/2018

---

**요 지 :** 콘크리트의 구성모델은 많은 연구를 통해 부재의 비선형 거동을 합리적으로 예측할 수 있도록 여러 모델이 개발되어 왔고 철근의 구성모델은 철근과 콘크리트의 부착 효과에 따른 인장 강화 현상을 반영한 모델이 연구되고 있지만 완전탄소성이나 이선형 변형도 경화 모델이 일반적으로 사용되고 있다. 코어 벽체로 활용하기 위해 개발하고 있는 복합 PC 패널의 반복가력 실험을 통해 길이 방향 철근의 좌굴에 의해 비선형 거동이 발생하였음을 확인하였다. 이 연구에서는 이와 같은 비선형 거동을 해석적으로 모사하기 위해 철근의 매입과 좌굴의 영향을 고려할 수 있는 구성모델들을 조사하였고 이 구성모델들을 재구성하여 새로운 모델을 제시하였다. 또한 제시한 모델의 타당성을 검증하기 위해 해석결과를 콘크리트 벽체와 복합 PC 패널 실험결과와 비교하였다. 철근의 매입 효과만 고려된 모델을 사용한 해석결과는 항복 이후 하중의 감소 없이 변형이 증가하는 거동을 예측하고 있지만, 제안 모델은 항복 이후 하중의 감소를 표현할 수 있어 콘크리트 패널의 거동을 예상하는 재료 모델로 활용할 수 있을 것으로 확인되었다.

**핵심용어 :** 매입 철근의 평균 응력도-변형도 관계, 철근 좌굴, 비선형 해석, 팽창각

---