

# 철근 정착길이를 고려한 개구부가 있는 철근콘크리트 전단벽의 유한요소해석

최 윤 범<sup>1</sup> · 이 성 철<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>국제원자력대학원대학교 원자력산업학과

## Nonlinear Finite Element Analysis for RC Shear Wall with an Opening Considering Rebar Development Length

Yun-Bum Choi<sup>1</sup> and Seong-Cheol Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of NPP Engineering, Kepco International Nuclear Graduate School, Ulsan, 45014, Korea

### Abstract

In this study, nonlinear finite element analysis based on the Modified Compression Field Theory has been conducted to evaluate shear strength of RC walls with opening. On the analysis, reinforcement ratio within development length of rebars nearby the opening was reduced in the model in order to investigate the effect of opening on shear strength of RC shear walls. The nonlinear finite element analysis has been verified through comparison with the test result in literature. Through the verification, it was investigated that the analysis considering the development length of rebars well reflected the effect of an opening on shear strength of RC shear walls while current design provisions did not reasonably consider one.

**Keywords** : shear wall, opening, development length, finite element analysis

### 1. 서 론

기존 콘크리트 전단벽에 개구부를 설치할 경우 철근콘크리트 전단벽에 배근된 철근의 전단내력 기여도를 고려하여야 한다. 이 때 배근된 철근이 최대 응력점으로부터 응력을 전개시키기 위해서 어느 정도 길이의 철근 또는 정착이 필요하다(MOLIT, 2012). 하지만, 기존 철근콘크리트 전단벽에 개구부를 설치한 경우 개구부 주변의 철근의 최소 정착길이 확보가 어려우므로 철근의 문힘 길이 전체에 대한 도달 가능한 평균 부착응력의 저하로 인해 전단내력의 감소가 발생한다(Yoon and Han, 2006; KEPIC, 2010). 따라서 철근 정착길이 내의 철근이 전단벽의 전단내력에 미치는 영향을 정확하게 평가하고 이를 해석에 적용하는 것이 필요하다.

이에 본 연구에서는 Kim 등(2004)에 의해 실험이 수행된 철근콘크리트 전단벽을 대상으로 철근 정착길이 영역에서의

철근비 조정을 통해 기존 철근콘크리트 전단벽에 개구부가 설치된 경우, 또는 개구부 주변 철근에 대한 정착이 확보되지 않은 경우에 대해 개구부가 있는 전단벽의 전단강도를 비선형 유한요소해석을 통해 보다 합리적으로 평가하고자 한다. 특히, 전단강도 예측에서 기계적 정착이 확보되지 않은 철근의 영향에 대해 비선형 유한요소해석을 통해 보다 상세히 분석하고자 한다.

### 2. 전단강도 설계기준

개구부가 있는 철근콘크리트 전단벽의 전단강도 예측을 위해 본 연구에서는 ACI 318-14(2014) 및 AIJ(1993)에서 제시하고 있는 전단강도 산정식을 검토 및 비교·분석하고자 한다. 특히, 전단벽 대비 개구부의 크기에 대한 영향을 분석하고자 한다.

\* Corresponding author:

Tel: +82-52-712-7357; E-mail: sclee@kings.ac.kr  
Received October 10 2016; Revised November 1 2016;  
Accepted November 2 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

### 2.1 ACI 318-14

ACI 318-14(2014)에서는 철근콘크리트 전단벽의 전단 강도( $V_n$ )에 대해 다음의 식 (1)로 산정하도록 되어 있다. 여기서, 개구부가 있는 경우 전단벽을 세그먼트 단위로 고려하여 가장 취약한 부분을 갖는 세그먼트의 전체 단면적에 대한 전단강도를 평가하도록 되어있다. 따라서, 일반적으로 개구부를 고려하여 철근콘크리트 전단벽에서의 단면적이 가장 작은 구간에 대해 전단강도를 산정하게 된다.

$$V_n = A_{cv}(\alpha_c \lambda \sqrt{f'_c} + \rho_t f_y) \tag{1}$$

여기서,  $A_{cv}$ 는 전단벽에 가해지는 전단력의 방향에 대한 철근콘크리트 전단벽 내 콘크리트의 순 단면적을 의미한다. 계수  $\alpha_c$ 는 전단벽의 길이 대비 높이에 대한 형상비를 고려한 콘크리트의 상대적인 기여도를 정의하는 계수로  $h_w/l_w$ 가 1.5 이하일 경우 3.0,  $h_w/l_w$ 가 2.0 이상일 경우 2.0을 적용하며,  $h_w/l_w$ 가 3.0에서 2.0 사이일 경우 1.5와 2.0 사이에서 선형 보간한 값을 적용한다.  $\lambda$ 는 경량콘크리트일 경우 적용하는 계수,  $f'_c$ 는 콘크리트 압축강도,  $\rho_t$ 는 콘크리트 단면적에 대한 횡보강 철근비,  $f_y$ 는 철근의 항복강도이다.

위 식에서 보는 바와 같이 ACI 318-14에서는 철근콘크리트 전단벽의 전단강도 산정 시 개구부가 있는 경우에도 개구부 주변 철근의 정착 확보 유무를 고려하지 않고 있다.

### 2.2 AIJ(1993)

Architectural Institute of Japan(1993)은 개구부가 설치된 전단벽의 전단강도 산정 시 개구부의 형상비를 고려한 강도저감계수를 통해 전단강도를 평가하고 있다. 개구부가 없는 전단벽의 전단강도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_u = t_w l_w p_s \sigma_{sy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w l_{wa} \nu \sigma_B / 2 \tag{2}$$

$$\tan \theta = \sqrt{(h_w / l_{wa})^2 + 1} - h_w / l_{wa} \tag{3}$$

$$\beta = (1 + \cot^2 \phi) \rho_s \cdot \sigma_{sy} / (\nu \cdot \sigma_B) \tag{4}$$

$$\nu = 0.7 - \sigma_B / 200 \tag{5}$$

여기서,  $t_w$ 는 전단벽 두께,  $l_{wa}$  및  $l_{wb}$ 는 아치 및 트러스 기구의 등가 전단벽 길이,  $p_s$ 는 전단벽의 전단보강근비,  $\sigma_{sy}$ 는 전단벽 내 전단 보강근의 신뢰강도,  $\cot \phi$ 는 전단벽의 전단강도 산정 시 적용하는 값으로서 1을 취할 수 있으며,  $\nu$ 는 콘크리트의 유효강도계수,  $\sigma_B$ 는 콘크리트의 압축강도이다.

리트의 유효강도계수,  $\sigma_B$ 는 콘크리트의 압축강도이다.

한편, 철근콘크리트 전단벽 내 개구부가 있을 경우 개구부의 형상을 고려한 강도저감계수를 적용하도록 되어 있으며, 제시된 강도저감계수는 철근콘크리트 전단벽 크기 대비 개구부의 길이, 높이, 그리고 면적비에 대한 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$r = \min(1 - \frac{l_0}{l}, 1 - \sqrt{\frac{h_0 l_0}{hl}}, 1 - \frac{h_0}{h}) \tag{6}$$

여기서,  $h_0$  및  $l_0$ 는 개구부의 너비 및 높이를 의미한다. 단, 식 (2)~(3)이 적용 가능한 등가 개구부비는 아래와 같이 제한되어 있다.

$$\sqrt{\frac{h_0 l_0}{hl}} \leq 0.4 \tag{7}$$

위 식에서 보는 바와 같이 AIJ에서는 철근콘크리트 전단벽의 전단강도 산정 시 ACI 318-14에 비해 보다 상세하게 개구부의 형상을 고려하고 있으나, 개구부 주변 철근의 정착 확보 유무는 고려하지 않고 있다.

### 2.3 설계기준 비교

앞 절에서 요약한 바와 같이, 개구부가 있는 철근콘크리트 전단벽에 대한 전단강도 산정식이 ACI 318-14 및 AIJ (1993)에서 서로 크게 다른 것을 알 수 있다. 이를 보다 상세히 분석하기 위해 본 논문에서는 Kim 등(2004)에서 내하력 실험이 수행된 시험체를 기반으로 전단벽 길이 2.0m, 높이 0.9m, 두께 70mm, 수평 및 수직 철근비 0.46%의 철근콘크리트 전단벽에 대해 개구부의 면적을 변수로 하여,

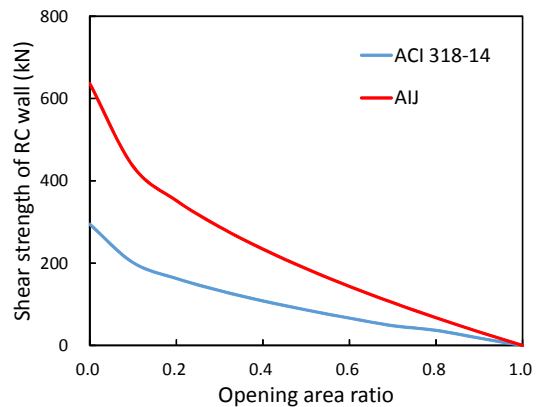


Fig. 1 Comparison of shear strength provisions for RC shear wall with opening

ACI 318-14 및 AIJ(1993)에 의해 예측되는 전단강도를 서로 비교하여 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이, 주어진 대상 철근콘크리트 전단벽에 대해 두 설계기준 모두 개구부의 크기가 커질수록 전단강도가 점점 감소하는 경향을 보여주었다. 하지만, AIJ(1993)의 경우 ACI 318-14에 비해 전단강도를 약 2배 정도로 예측하는 것으로 나타나, 실제 개구부가 있는 철근콘크리트 전단벽의 전단강도 예측에 있어 두 설계기준이 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 두 설계기준 모두 개구부 주변 철근의 정착 유무를 고려하지 않아, 철근콘크리트 전단벽 내 개구부 주변 철근에 대한 정착이 제대로 확보되지 않을 경우 전단강도 예측에 상당한 어려움이 있을 것으로 판단된다.

### 3. 개구부를 고려한 유한요소해석

#### 3.1 대상구조물

기존 철근콘크리트 전단벽에 부분적으로 절단 또는 해체하여 개구부를 만드는 경우, 또는 철근콘크리트 전단벽 내 개구부 주변 철근들이 충분한 정착을 확보하지 않은 경우에 대해 전단강도를 보다 합리적으로 산정하기 위하여 본 연구에서는 Kim 등(2004)에서 내하력 실험이 수행된 시험체들을 대상으로 유한요소해석을 수행하였다. 해석 대상 시험체는 개구부가 없는 손상전의 철근콘크리트 전단벽 시험체와 개구부의 면적비가 30% 및 39%로 제작된 시험체 등 총 3개이다. 대상 시험체들은 길이 2.0m, 높이 0.9m, 두께 70mm의 전단벽을 가지는 것으로서, 전단벽 내 철근비는 수직 및 수평 방향 모두 0.46%로 동일하게 제작되었다. 전단벽의 콘크리트 압축강도는

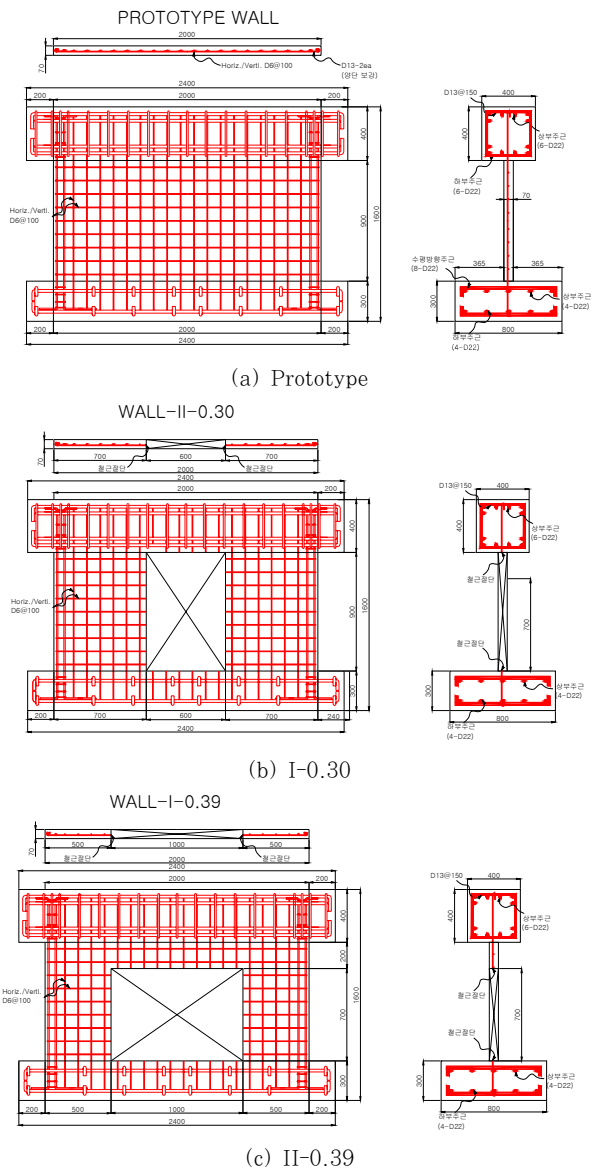


Fig. 2 Dimensions and rebar details of specimens

Table 1 Specification of specimen

Specimen	Thickness (mm)	Opening ratio	$\rho_x$	$\rho_y$	Wall dimension
Prototype	70	0%	0.46	0.46	2,000×900×70mm
I-0.30	70	30%	0.46	0.46	
II-0.39	70	39%	0.46	0.46	

Table 2 Concrete characteristic

Compressive strength $f'_c$ (MPa)	Elastic Modulus $E_c$ (MPa)	Poisson's ratio
21.23	21.92	0.15

Table 3 Reinforcement characteristic

Rebars	Yield strength $f_y$ (MPa)	Tensile strength $f_u$ (MPa)
D6	291.2	375.0
D13	445.0	568.6

21.23MPa이었으며, 철근의 항복강도는 수평 및 수직 전단 철근의 경우 291.2MPa, 주철근의 경우 445.0MPa이었다. 다음의 Fig. 2는 시험체 규격 및 철근 배근 상세를, Table 1은 시험체 내 주요 변수를, Table 2 및 3은 콘크리트 및 철근의 재료 물성치를 정리한 것이다.

#### 3.2 유한요소해석 모델링

##### 3.2.1 개구부 주변 철근의 정착 효과

철근의 정착을 확보하기 위해서는 철근콘크리트 부재 각 단면의 철근에 작용하는 인장력 또는 압축력이 단면의 양측에서 발휘될 수 있도록 문힘길이, 갈고리, 기계적 정착 또는 이들의 조합에 의하여 철근을 정착하여야 한다(MOLIT,

2012). 하지만 철근콘크리트 전단벽에서 개구부를 후설치할 경우 개구부 주변 콘크리트의 손상 및 개구부 주변 철근들에 대해 정착이 확보되지 않을 가능성이 있다. 즉, 개구부로부터 콘크리트구조기준(2012)에서 주어진 정착길이 내 영역에서의 철근들은 정착이 확보되지 않을 경우 철근콘크리트 전단벽의 구조 거동에 크게 기여하지 않는 것으로 가정할 수 있다. 콘크리트구조기준(2012)에서 주어진 철근의 정착길이는 다음과 같다.

$$l_{db} = \frac{0.6d_b f_y}{\lambda \sqrt{f_{ck}}} \quad (8)$$

여기서,  $d_b$ 는 철근의 공칭지름,  $\lambda$ 는 콘크리트 경량계수이다. 단, 위 식에 의해 산정된 정착길이  $l_{db}$ 는 항상 300 mm 이상이어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 비선형 유한요소해석을 통해 개구부가 있는 철근콘크리트 전단벽의 전단강도 예측 시 정착이 확보되지 않은 개구부 주변 철근들의 영향을 고려하기 위해 대상 시험체에 대한 유한요소해석 모델링 시 개구부로부터 정착길이 내에 배근된 철근 중 개구부로 인해 절단된 철근에 대한 철근비를 인위적으로 감소시켰다.

### 3.2.2 해석 모델링

본 연구에서는 앞서 소개된 Kim 등(2004)에 의해 내하력 실험이 수행된 철근콘크리트 전단벽을 대상으로 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 비선형 유한요소해석을 위해 수정 압축장 이론(Vecchio and Collins, 1986; Vecchio, 2000)에 근간을 둔 2차원 평면 유한요소해석 프로그램인 VecTor 2(2013)를 사용하였다.

해석 모델링 시 Fig. 3에서 보는 바와 같이 콘크리트는 4절점 평면요소로 고려하였으며, 주철근 및 전단철근들은 해당 구역에서의 콘크리트 요소 내에 분산(smeared)된 것으로 고려하였다. 또한, 시험체에 가해진 수직 하중을 실제 실험과 유사하게 묘사하기 위해 수직 하중이 직접 가해진 전단벽 시험체 위에 놓인 강재를 함께 모델링하였으며, 시험체에 가해진 수평 하중은 해석 시 수평 방향 변위를 가하는 것으로 고려하였다.

또한, 개구부로부터 정착길이 내 구역에서 정착이 확보되지 않은 철근에 대한 영향을 고려하기 위해 모델링 시 개구부 주변의 철근정착길이 내 철근비를 주요 변수로 설정하여 해석을 수행하였다. 즉, 콘크리트구조기준(2012)에 제시된 이형철근에 요구되는 정착길이에 따라 개구부로부터 300mm 내에 배근된 철근 중 개구부로 인해 정착이 확보되지 않은 철근에 대한

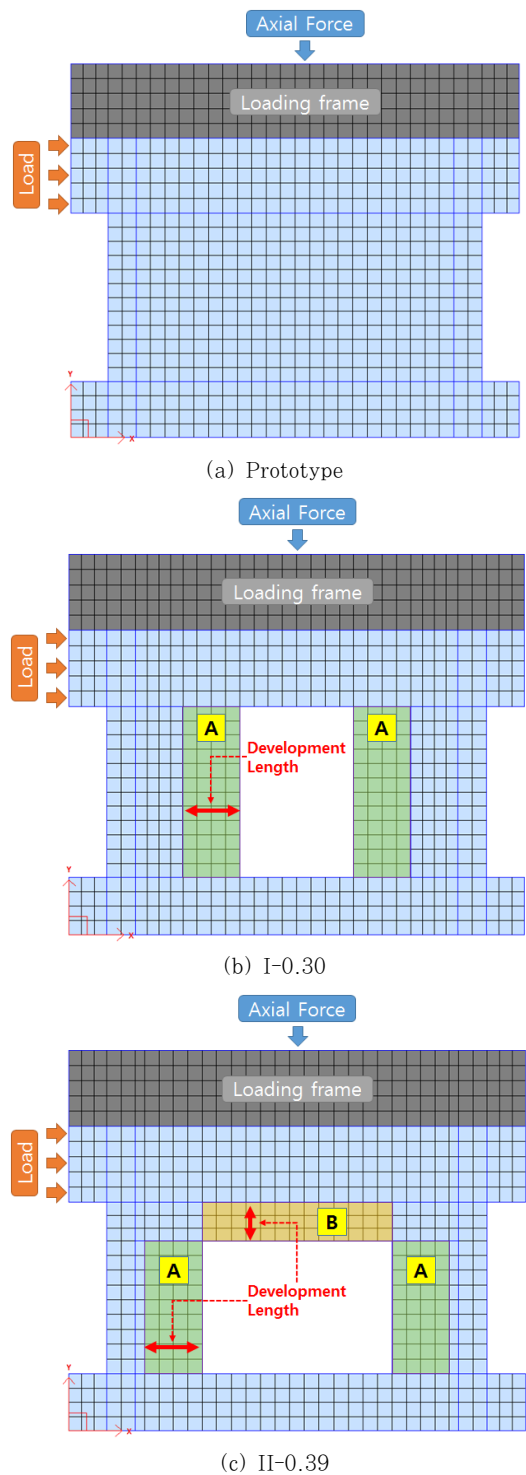


Fig. 3 Modeling of RC walls w/o or w/ opening

철근비를 변수로 고려하였다. 개구부로부터 정착길이 내 구역에 대한 철근비 상세 내용은 Table 3~4에 정리하였으며, Case 1은 정착이 확보되지 않은 철근을 무시한 경우, Case 2는 정착 확보 유무와 관계없이 모든 철근을 고려한 해석을 의미한다.

**Table 4** Reinforcement ratio for development zone in RC wall with 30% opening (%)

Direction	Case 1	Case 2
$\rho_x$	0	0.46
$\rho_y$	0.46	0.46

**Table 5** Reinforcement ratio for development zone in RC wall with 39% opening (%)

Direction	Case 1		Case 2
	region A	region B	
$\rho_x$	0	0.46	0.46
$\rho_y$	0.46	0	0.46

### 3.3 재료해석 모델

철근콘크리트 전단벽의 전단 거동 및 강도를 합리적으로 묘사하기 위해서는 이축 응력 상태에서의 철근콘크리트 요소의 균열 발생 후 비선형 구조 거동을 합리적으로 묘사하여야 한다. 본 논문에서는 수정압축장 이론(Vecchio and Collins, 1986; Vecchio, 2000)을 바탕으로 유한요소해석을 수행하였으며, 수정압축장 이론에 적용되는 콘크리트 및 철근의 재료해석 모델들을 적용하였다.

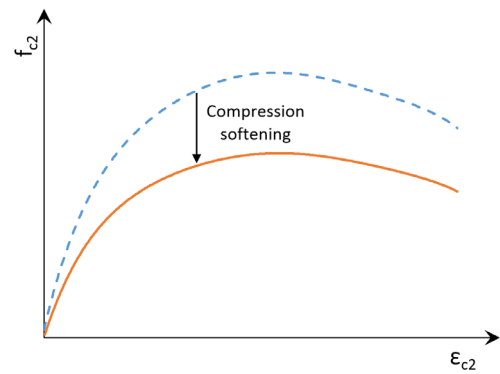
유한요소해석 시 콘크리트의 구조 및 거동을 정확하게 표현하기 위해 콘크리트 재료의 속성을 합리적으로 묘사하여야 한다. 본 연구에서는 구조물의 거동을 정확하게 묘사하기 위해 압축연화(compression softening) 및 인장증강(tension stiffening) 효과를 고려하였다.

#### 3.3.1 콘크리트

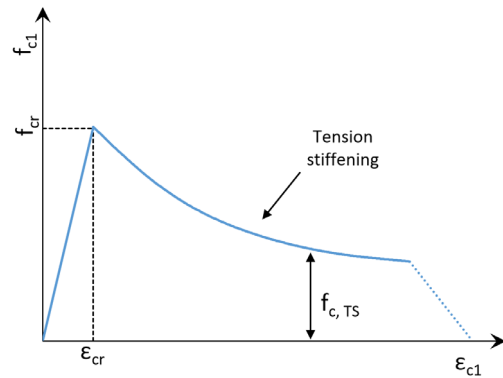
이축 응력 하에서의 콘크리트의 압축거동은 주인장 방향으로의 균열에 의한 영향으로 인해 주압축 방향으로의 응력-변형률 거동이 일축 응력 하에서의 거동과 상당히 다르게 나타난다. 즉, Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 주어진 주압축 변형률에 대해 주인장 변형률이 증가할수록 일축 응력 하에서의 거동보다 작은 압축 응력이 나타나게 되며, 이를 압축연화효과(compression softening effect)라고 한다 (Vecchio and Collins, 1986). 본 논문에서는 압축연화 효과를 고려하기 위해 2차 포물선 모델을 바탕으로 주압축 방향으로의 콘크리트 거동에 대해 다음의 식을 해석에 활용하였다.

$$f_{c2} = f_p \left[ 2 \left( \frac{\epsilon_{c2}}{\epsilon_p} \right) - \left( \frac{\epsilon_{c2}}{\epsilon_p} \right)^2 \right] \quad (9)$$

여기서,  $\epsilon_{c2}$ 는 콘크리트의 주압축 변형률을 의미하며,  $f_p$  및



(a) Compressive behavior



(b) Tensile behavior

**Fig. 4** Model for stress-strain response of concrete

$\epsilon_p$ 는 주인장 변형률에 의한 압축연화효과를 고려한 콘크리트 압축거동에서의 최대 압축응력 및 이에 상응하는 변형률로서, 일축 응력 하에서의 압축강도( $f'_c$ ) 및 이에 상응하는 변형률 ( $\epsilon'_c$ )에 다음의 식(Vecchio, 1992)에 주어진 압축연화계수 ( $\beta_d$ )를 곱함으로써 산정할 수 있다.

$$\beta_d = \frac{1}{1 + C_s C_d} \leq 1.0 \quad (10)$$

여기서,  $C_s$  및  $C_d$ 는 주인장 및 주압축 변형률의 비와 균열면 전단 슬립을 고려한 계수들을 각각 의미한다.

철근콘크리트 구조물에 균열이 발생할 경우, 철근과 콘크리트 사이의 부착으로 인해 균열과 균열 사이 콘크리트의 인장응력이 발생하게 되며, 이로 인해 인장 거동에서 콘크리트의 기여도가 발생하게 된다. 이를 인장강화효과(tension stiffening effect)라고 하며, 본 논문에서는 Fig. 4(b) 및 다음의 식과 같이 Modified Bentz 모델(Vecchio, 2000; Bentz, 2005)을 적용하였다.

$$f_{c1} = \frac{f_{cr}}{1 + \sqrt{2.16 M \epsilon_{c1}}} \quad \text{for } \epsilon_{c1} > \epsilon_{cr} \quad (11)$$

여기서,  $f_{cl}$  및  $\epsilon_{cl}$ 은 콘크리트 주인장 응력 및 변형률을,  $f_{cr}$  및  $\epsilon_{cr}$ 은 콘크리트 균열강도 및 이에 상응하는 변형률을 각각 의미하며,  $M$ 은 철근 지름 및 철근비를 고려한 계수이다.

### 3.3.2 철근

철근의 응력-변형률 거동은 다음의 식에 나타난 바와 같이 것처럼 선형탄성구간, 소성구간, 그리고 파단 전까지 변형률 경화구간의 3부분으로 구분하여 해석에 적용하였다.

$$f_s = \begin{cases} E_s \epsilon_s & \text{for } \epsilon_s \leq \epsilon_y \\ f_y & \text{for } \epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_{sh} \\ f_y + (\epsilon_s - \epsilon_{sh}) E_{sh} & \text{for } \epsilon_s > \epsilon_{sh} \end{cases} \quad (12)$$

여기서,  $f_s$ 는 철근의 응력,  $f_y$ 는 철근의 항복강도,  $\epsilon_s$ 는 철근의 변형률,  $\epsilon_y$ 는 항복 변형률,  $\epsilon_{sh}$ 는 변형률 경화가 시작되는 시점의 변형률,  $E_s$ 는 탄성계수, 그리고  $E_{sh}$ 는 변형률 경화 구간에서의 강성을 의미한다.

## 4. 해석결과 분석 및 검증

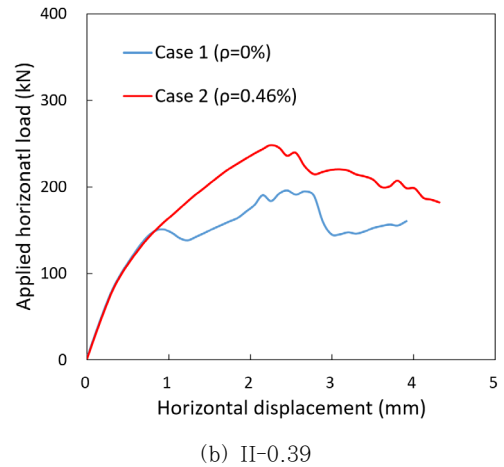
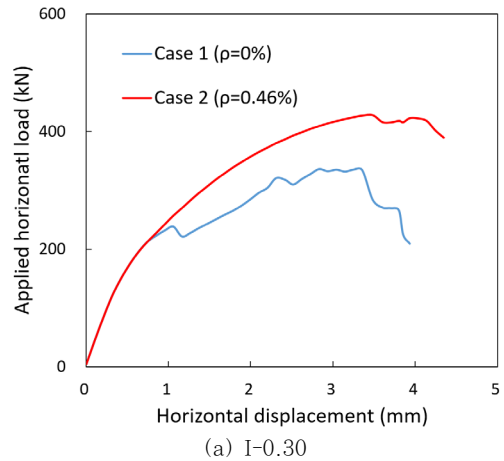
### 4.1 실험결과와의 비교 및 검증

개구부 주변 정착이 확보되지 않은 철근의 영향을 분석하기 위해 수행한 비선형 유한요소해석 결과를 실험에서 실제 측정된 전단강도와 비교하여 Table 6에 정리하였다. 또한, 본 연구에서 수행한 유한요소해석의 합리성을 확인하기 위해 개구부가 없는 시험체에 대해서도 해석을 수행하였다. 표에서 나타난 바와 같이, 개구부가 없는 시험체의 경우 해석 결과에서 예측된 전단강도가 실제 실험에서 측정된 전단강도와 매우 유사한 것으로 나타나 본 연구에서 수행한 유한요소해석이 합리적인 것을 알 수 있다.

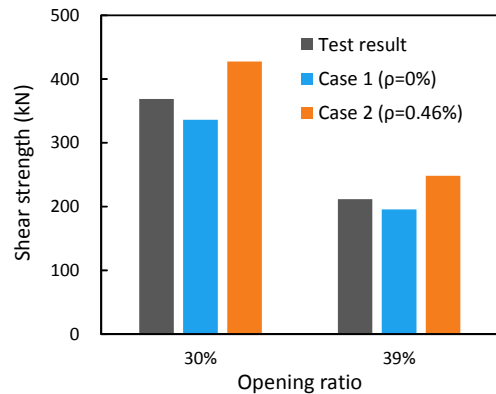
한편, 개구부가 있는 전단벽에 대해 개구부 주변 정착길이 내 철근비의 변화에 따라 해석으로부터 예측되는 전단벽의 전단강도가 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 5에서 보는 바와 같이 전단벽 내 전단 균열 발생 이후 개구부 주변 정착길이 내 철근비의 변화에 따라 해석으로부터 예측되는 전단 거동 또한 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다. Table 5 및 Fig. 6에서 보는 바와 같이 철근 정착 유무를

**Table 6** Shear strength of non-linear finite element analysis (kN)

Specimen	Test	Case 1	Case 2
Prototype	737.8	-	762.6
I-0.30	368.8	336.0	427.6
II-0.39	211.6	195.7	248.3



**Fig. 5** Effect of rebar development on load-displacement response of shear walls with opening

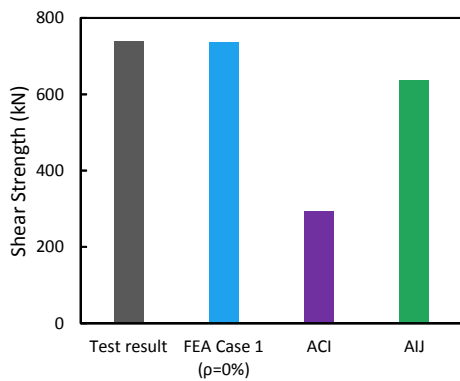


**Fig. 6** Comparison of actual and predicted shear strength of shear walls with opening

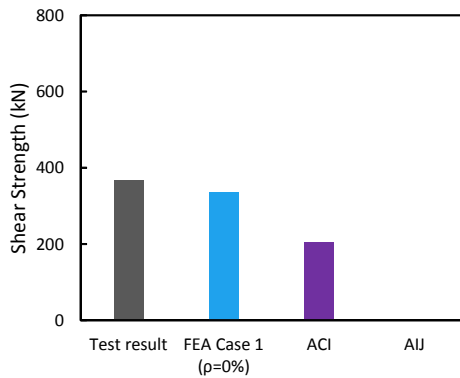
고려하지 않은 해석(Case 2)의 경우 전단벽의 전단강도를 과대평가하는 반면, 정착길이 내 철근비를 0으로 가정한 해석(Case 1)의 경우 실제 실험에서 측정된 전단강도를 보다 합리적으로 예측하는 것으로 나타났다. 따라서, 개구부 내 철근의 정착이 확보되지 않았을 경우 개구부 주변 철근의 전단강도에 대한 기여도가 상당히 낮은 것으로 판단된다.

### 4.2 설계기준과의 비교 및 분석

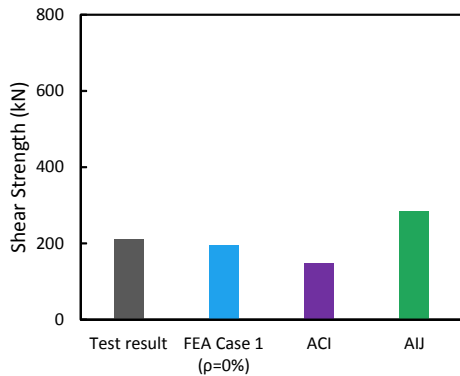
실험결과 및 개구부 주변 철근의 정착 효과를 고려한 유한요소해석에 의해 예측된 전단벽의 전단강도를 현행 설계기준인 ACI 318-14 및 AIJ(1993)에 의해 산정된 전단강도를 Fig. 7에 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 개구부가 없는 철근콘크리트 전단벽 시험체의 전단강도에 대해 ACI 318-14는 보수적으로 평가하는 반면 유한요소해석 및 AIJ(1993)는 비교적 합리적으로 예측하는 것으로 나타났다.



(a) Prototype



(b) I-0.30



(c) II-0.39

Fig. 7 Comparison of test results, FEA predictions, and design provisions for RC walls shear strength

한편, 개구부가 있는 철근콘크리트 전단벽 시험체들에 대해 본 논문에서 수행한 유한요소해석에서 개구부 주변 철근의 정착 효과를 고려한 경우 전단강도를 합리적으로 예측하는 것으로 나타났다. 이에 반해, ACI 318-14 및 AIJ(1993)의 경우 실제 실험에서 측정된 전단강도와 예측값이 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. ACI 318-14의 경우 개구부 면적에 관계없이 보수적으로 전단강도를 예측하였다. AIJ(1993)의 경우 개구부 면적비가 30%인 시험체에 대해서는 개구부의 높이가 전단벽의 높이와 동일함에 따라 전단강도를 0으로 산정한 반면, 개구부 면적비가 39%인 시험체에 대해서는 전단강도를 오히려 과대평가하는 것으로 나타나, 다양한 개구부의 형상에 따른 전단강도에의 영향을 강도감소계수가 제대로 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서, 개구부가 있는 철근콘크리트 전단벽의 전단강도를 보다 합리적으로 예측할 수 있는 모델 개발이 필요한 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 개구부를 가진 철근콘크리트 전단벽의 전단강도를 보다 합리적으로 예측하기 위해 개구부 주변 정착이 확보되지 않은 철근을 별도로 고려하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 본 연구 결과 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수정압축장 이론에 기반한 유한요소해석 결과 개구부의 유무에 관계없이 철근콘크리트 전단벽의 전단강도를 합리적으로 예측할 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) 비선형 유한요소해석 결과 개구부 주변 철근들에 대한 정착이 확보되지 않았을 경우 개구부 주변 정착길이 내의 철근들은 철근콘크리트 전단벽의 전단 강도에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.
- 3) 개구부 주변 철근의 정착이 확보되지 않은 경우 개구부 주변 정착길이 내 철근들의 기여도를 무시한 유한요소해석이 실험으로부터 측정된 전단강도를 보다 유사하게 예측하는 것으로 나타났다.
- 4) 현행 ACI318-14 및 AIJ(1993) 기준은 철근콘크리트 전단벽의 전단강도 산정에 있어 다양한 크기 및 형상의 개구부의 영향을 합리적으로 반영하지 못하는 것으로 판단된다.
- 5) 본 논문의 주요 연구 내용 및 결과는 기존 철근콘크리트 전단벽에 개구부를 신설한 경우, 개구부 주변 철근의 기여도를 무시함으로써 철근콘크리트 전단벽의 전단강도를 보다 합리적으로 예측하는데 유용할 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 2016년 KINGS의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### References

**ACI Committee 318** (2014) *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, pp.293~294.

**AIJ** (1993) AIJ Standard for Structural Calculation of Reinforced Concrete Structures, *Archi. Inst. Japan*, version6, pp.221~239.

**Bentz, E.C.** (2005) Explaining the Riddle of Tension Stiffening Models for Shear Panel Experiments, *ASCE J. Struct. Eng.*, 131(9), pp.1422~1425.

**KEPIC** (2010) *SGB Reinforced Concrete Structure*, p.300.

**Kim, S.W., Han, B.C., Kim, H.J., Choi, G.B., Choi, C.S., Yun, H.D.** (2004) Experimental Study on Artificially Damaged Rectangular R/C Shear

Walls with Opening Configurations, *Proc. Korea Concr. Inst.*, 24(2).

**MOLIT** (2012) *Concrete Structure Specifications*, p.342.

**Vecchio, F.J.** (2000) Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation, *ASCE J. Struct. Eng.*, 126(9), pp.1070~1077.

**Vecchio, F.J., Collins, M.P.** (1986) The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subject to Shear, *ACI J.*, 83(2), pp.219~231.

**Vecchio, F.J., Collins, M.P.** (1993) Compression Response of Cracked Reinforced Concrete, *ASCE J. Struct. Eng.*, 119(12), pp.3590~3610.

**Wong, P.S., Vecchio, F.J., Trommels, H.** (2013) *VecTor2 FormWorks User's Manual*, Second Edition, University of Toronto, Canada, p.318.

**Yun, H.D., Han, M.K.** (2006) A Nonlinear Finite Element Analysis on Behavior of Existing Full Scale Reinforced Concrete Shear Walls with Artificially-Introduced Opening, *J. Archi. Inst. Korea*, 22(7), pp.3~10.

### 요 지

본 논문에서는 개구부가 있는 철근콘크리트 전단벽의 전단강도를 산정하기 위해 수정압축장 이론에 기반을 둔 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 철근콘크리트 전단벽의 전단강도에서 개구부의 영향을 분석하기 위해 개구부 주변 정착길이 내 철근들에 대한 철근비를 해석 모델에서 감소시켰으며, 비선형 유한요소해석은 기존 문헌에 제시된 시험 결과와의 비교를 통해 검증되었다. 실험 결과와의 비교를 통해 개구부 주변 철근들의 정착길이를 고려한 비선형 유한요소해석의 경우 철근콘크리트 전단벽의 전단강도 예측에 있어 개구부의 영향을 잘 반영한 것으로 나타났다. 이에 반해, 현행 설계기준들은 전단강도를 합리적으로 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 본 논문은 향후 기존 철근콘크리트 전단벽에 개구부를 설치하는 경우, 전단벽의 합리적인 전단강도 예측에 유용할 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 전단벽, 개구부, 정착길이, 유한요소해석