

유한요소해석에 의한 단부파쇄 후 수직철근이 보강된 철근콘크리트 전단벽의 휨 보강설계 기법 제안

Flexural Retrofit Design Method for Reinforced Concrete Shear Walls with Vertical Rebar Retrofitted after End Crushing Based on Finite Element Analysis.

손 동 희*
Son, Dong-Hee

Abstract

This study introduces a flexural retrofit design approach aimed at enhancing the flexural capacity of old reinforced concrete structural walls to support vertical extensions. A two-dimensional finite element model was developed in VecTor2 and validated through comparison with experimental results. The analytical model successfully captured the observed behavior, producing slightly conservative strength estimates due to partial composite interaction. Structural walls retrofitted with boundary elements exhibited improved flexural performance, characterized by increased maximum strength but reduced ductility as the amount of additional vertical reinforcement rose. A new design procedure was formulated by integrating a strain modification coefficient into the strength reduction factor. This approach maintains structural safety while accounting for the ductility reduction observed in the retrofitted walls. The proposed method offers a reliable and practical solution for flexural retrofitting of reinforced concrete structural walls.

키워드 : 휨 보강, 휨 강도, 강도감소계수, 연성

Keywords : flexural retrofit, flexural strength, strength reduction factor, ductility

1. 서 론

한국에서는 노후 아파트의 세대 수 증가를 위한 목적으로 리모델링이 허용되고 있다. 특히 15층 규모의 아파트의 경우, 최대 3개 층의 수직 증축이 가능하다 (Kim et al., 2021). 이러한 수직 증축 대상 건물은 일반적으로 철근콘크리트 보통 전단벽 구조물이다. 일반적인 철근콘크리트 구조물의 증축에서는, 지진하중에 의한 휨과 전단에 대해 저항하는 요소 전단벽이다. 대부분의 수직 증축 대상 건물은 노후화된 구조물로, 당시의 내진 설계 기준과 현재의 기준 사이에는 큰 차이가 있다. 현재의 내진 설계 기준은 훨씬 엄격하며, 구조물의 자중이 증가함에 따라 기존 벽체는 휨 및 전단에 대해 보강되어야 구조 안전성을 확보할 수 있다.

Sun et al. (2020)은 CFRP strip을 외부에 부착하여 손상을 입은 벽체의 내진보강을 수행하였다. 또한 Todut and Stoian (2015)는 개구부가 있는 벽체에 대해 FRP sheet를 부

착하여 내진성능을 향상시켰다. Back et al. (2022)는 조적벽에 Textile reinforced mortar를 이용하여 보강을 수행하였다. 그러나 이러한 방법은 철근콘크리트가 아닌 이질재료를 이용한 보강으로서 장기변형으로 인한 응력집중 뿐만 아니라 내구성, 화재 등이 발생할 경우 구조성능을 확보할 수 없는 단점이 발생한다. 이를 위해서는 단면적의 증가 없이 철근콘크리트로 보강하여 구조성능을 향상시켜야 한다.

Choi et al. (2022)은 기존 전단벽의 단부를 파쇄하고 추가 수직철근을 배근 한 뒤 재타설을 하는 새로운 휨 보강 공법을 제안하였다. 해당공법을 통해 Figure 1, 2과 같이 단면의 증타 없이 기존 벽체의 길이와 동일하더라도 휨 강도를 증진시킬 수 있는 방법을 제안하였으며 실험을 통해 휨 보강 효과를 확인하였다. 뿐만 아니라, 보강공법 적용에 따른 휨 거동 메커니즘을 규명하였으며 이를 기반으로 휨 보강 설계를 위한 가정사항을 제안하였다. 그러나 해당 연구에서는 구조벽체의 휨 보강 효과를 확인하는 것이 주요 목적이었다. 현장에 보강량을 정량적으로 산정하여 보강공법을 적용하기 위해서는 휨 보강 설계를 할 수 있어야 한다. 휨 보강 설계를 위해서는 다양한 변수가 휨 강도에 미치는 영향을 평가해야 하며 이를 위해서는 다양한 변수에 대한 유한요소해석이 필수적이다.

본 연구에서는 벽체와 같은 판요소가 주요 하중저항 요

* 한국교통대 건축공학과 조교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, dhson@ut.ac.kr)

2025년 국립한국교통대학교 글로벌대학30사업의 지원을 받아 수행하였음

소인 벽체의 거동을 모사하는 데에 대한, 수정압축장 이론(Modified Compression Field Theory, MCFT) 에 기초한 VecTor2 의 활용도를 기반하여, 경계요소가 보강된 철근 콘크리트 전단벽의 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 유한요소해석 결과를 활용하여 휨 설계 시 미치는 다양한 변수에 대해 분석하고 이를 기반으로 휨 보강 설계법을 제안하였다. 해석적 연구는 2D Modeling 방법 수립, 모재 및 모재와 보강부 사이 계면에서의 재료모델의 결정, 실험결과와의 비교, 해석을 통한 매개변수 분석 순서로 수행되었다. 기존 연구 결과 (Choi et al., 2022) 경계요소 철근비에 따라 휨 강도 및 변형률 분포가 다른 것을 확인하였으며 스티드 보강에도 불구하고 하중-변위관계에는 큰 차이를 보이지 않음에 따라 해석 시 적용한 주요 변수는 경계요소의 수직철근비로 설정하였다. 실험결과로 도출된 하중-변위곡선과 단면 변형률 분포를 해석 결과와 비교 분석하여 유한요소해석의 신뢰성을 검증하였으며 이를 바탕으로 한 보강부의 수직철근비 변화에 따른 성능 비교 결과를 활용하여 설계안을 도출하고자 하였다.

2. RC 전단벽의 유한요소해석

2.1 VecTor2 모델링

본 연구에서 해석모델 구축 및 검증의 대상이 되는 실험체는 Choi et al. (2022)에서 수행된 단부 파쇄형 보강공법이 적용된 구조벽체이며 형상비가 1.73이면서 휨에 의해 지배를 받는 벽체이기 때문에 본 연구에서는 해당 형상비를 대상으로 해석적 검증을 수행하였다. FEM 해석에서는 모델링 단계에서 이를 반영할 수 있으므로 실제 실험체와 같이 기존벽체와 보강단부 간 철근으로 연결하고 콘크리트는 5 mm 이격하여 모델링하였다. 실제로는 기존 벽체와 보강벽체의 콘크리트간 부착력에 의해 초기에 합성거동을 하나 본 연구에서는 실험결과의 보수적인 평가를 위해서 각 벽체를 이격하였다. 결과적으로 전단마찰산정에 있어 콘크리트 면에 의한 변수는 제거하고 철근에 의한 전단마찰만 고려하였다.

기존 연구 (Choi et al., 2022)에서 확인 가능한 바와 같이, 후시공 철근의 정착길이는 보강된 철근콘크리트 전단

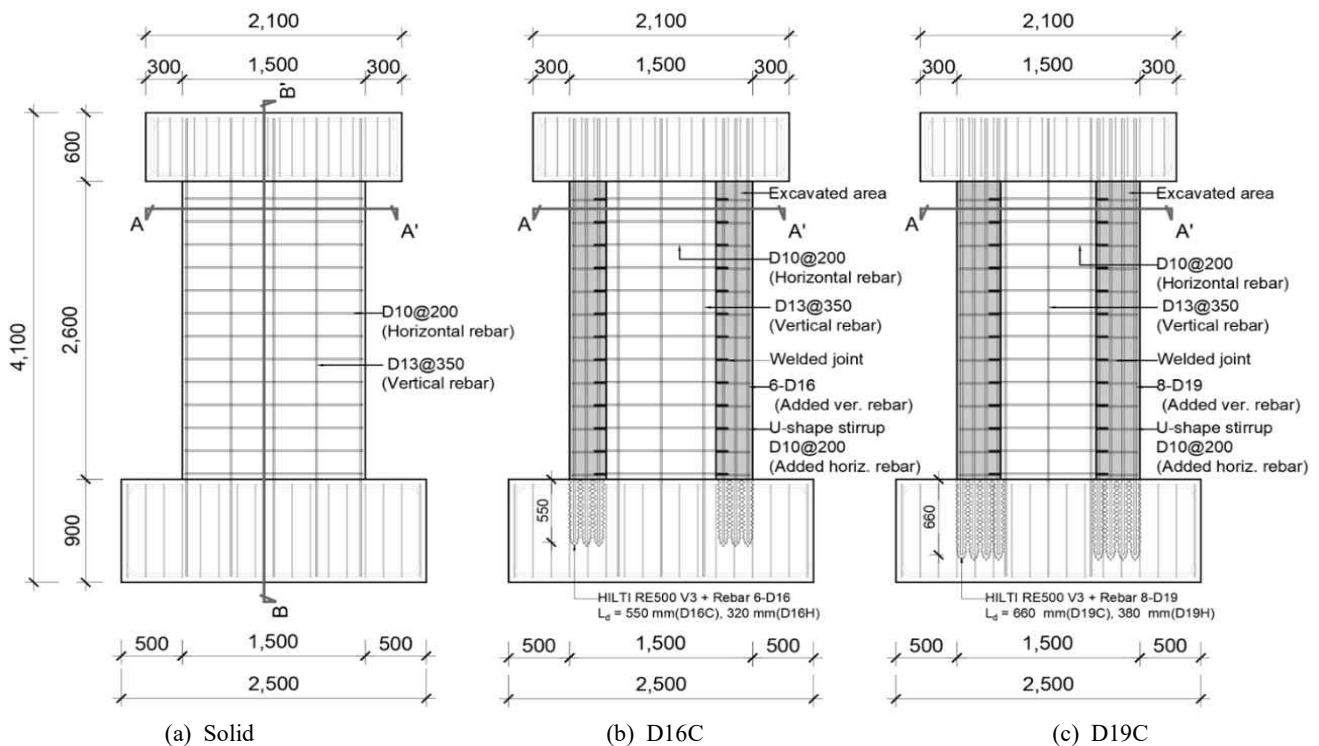


Figure 1. Specimens detail-Elevation (Choi et al., 2022)

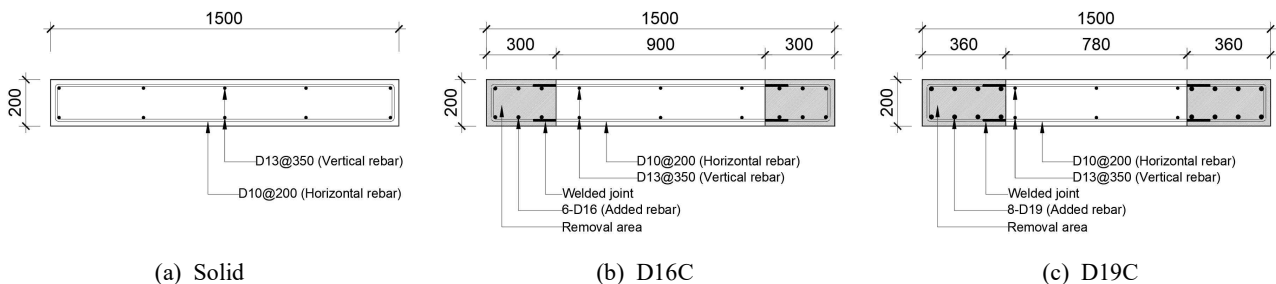


Figure 2. Section of the specimens (Choi et al., 2022)

벽의 휨 강도 발현에 영향을 끼치지 않기 때문에 모델링에서는 충분한 정착길이를 갖는 실험체 3개를 대상으로 수행하였다.

2.1 VecTor2 모델링

해석 모델은 Figure 3에 나타내었다. 해석에 사용된 콘크리트 모델에는 Attard & Setunge (1996) 이 제안한 압축 응력-변형률 관계를 적용하였다. 콘크리트 압축연화거동은 Vecchio 1992-B (c1/c0-Form) (Vecchio, 1992)을 사용하였다. Vecchio 1992-B (c1/c0-Form) 압축 연화거동 모델의 경우 MCFT 모델을 확장하여 Shear Slip 변형을 고려하고 있다. 벽체의 경우 콘크리트의 균열 발생은 휨과 전단 모두 지배를 받을 수 있기 때문에 Mohr-Coulomb을 사용하여 전단응력과 압축 및 인장응력 뿐만 아니라 전단응력을 모두 고려하여 균열을 예측하고자 하였다.

철근은 Bauschinger effect를 적용한 Seckin Model (Seckin, 1981)을 적용하였다. 정가력 사이클에서 변형률일 때 하중을 제거할 시에는 Bauschinger effect를 반영한 Ramberg-Osgood 방정식을 적용한다. 부차응력 미끌림 관계는 Eligehausen et al. (1983)에 의해 제안된 관계식을 적용하였다. 상승 곡선은 비선형이며 최대 부차응력 이후에는 일정한 값을 유지하다 하강 시에는 선형 관계를 유지한다.

3. 유한요소 해석모델 검증

3.1 하중-변위 관계 및 균열양상

SOLID, D16C, D19C 실험체들의 하중-변위 곡선과 VecTor2를 사용한 유한요소해석 결과와의 비교는 Figure

Lateral load

- Type: Reverse cyclic
- Repetitions: 3
- Inc. factor: 13 mm

Reinforcement

- Discrete element
- $E_s = 200,000 \text{ MPa}$
- $\epsilon_{sh} = 10 \text{ me}$
- $\epsilon_{sh} = 150 \text{ me}$

Concrete

- Attard & Setunge model
- $a_{max} = 25 \text{ mm}$
- $E_{cs}, f_{cs} \rightarrow$ Calculated by f_{ck}
- Mesh size :
(for retrofitted wall)
50 mm x 50 mm
(for existing wall)
100 mm x 100 mm

Boundary Condition

X, Y dir. Constraints

Axial load

- Type: Monotonic
- Constant load
- $P = 0.1A_g f_{ck} = 540 \text{ kN}$

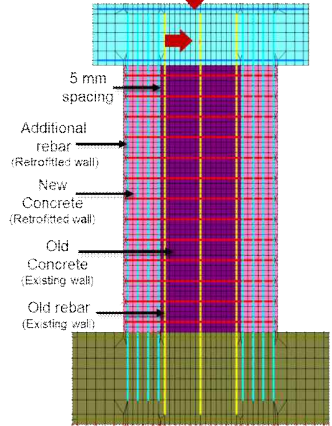


Figure 3. VecTor2 Modeling

4, 5에 나타내었다.

최대강도를 확인하였을 때, 분리단면으로 모델링한 VecTor2 해석 결과는 일체단면으로 가정하여 단면해석을 한 공칭휨강도(M_n)와 유사한 것을 확인할 수 있었다.

3.2 변형률 분포 양상

변형률 분포를 실험결과와 비교한 결과, Figure 6과 같이 VecTor2 에서도 마찬가지로 개별거동에 따라 변형률 분포가 불연속적으로 나타나는 것을 확인하였다. 최외단 인장철근의 경우 실험결과와 해석결과가 비슷하게 나타나는 것을 확인하였으나 중앙부 변형률이 해석결과가 실

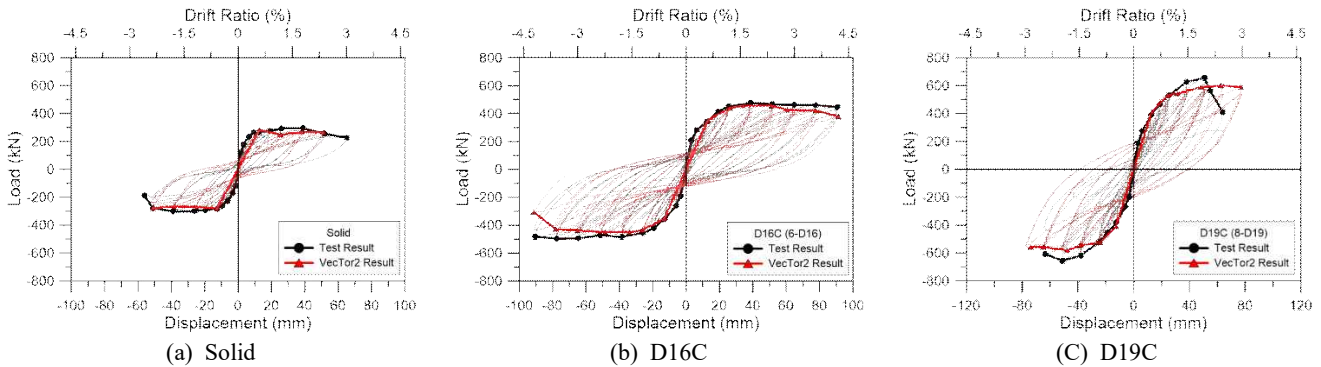


Figure 4. Load-displacement relationship

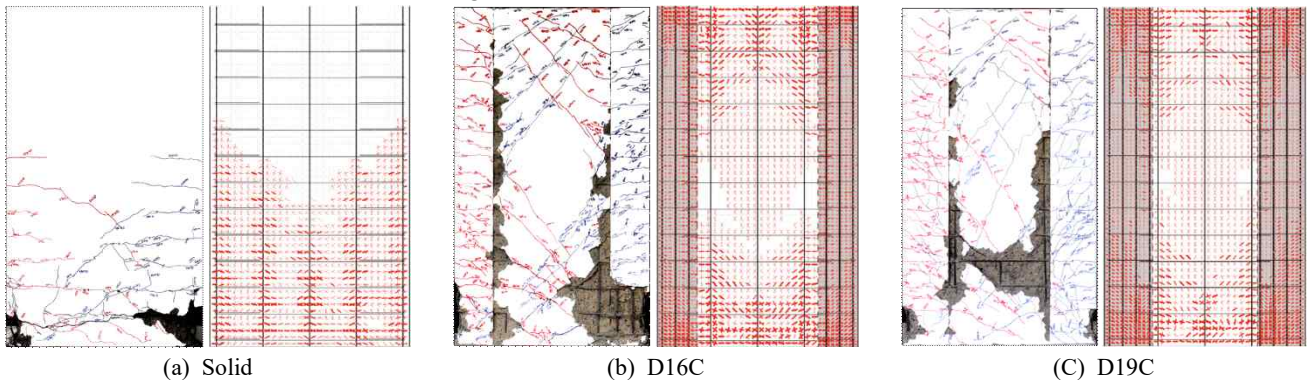


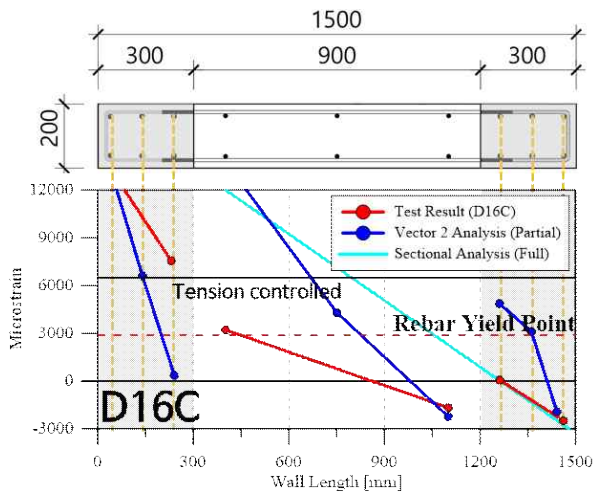
Figure 5. Crack patterns

험결과보다 큰 값을 나타내는 것을 확인하였다. 그러나 휨 설계 시 안전측으로 설계해야 함에 따라 기존 벽체의 휨 강도 기여분은 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

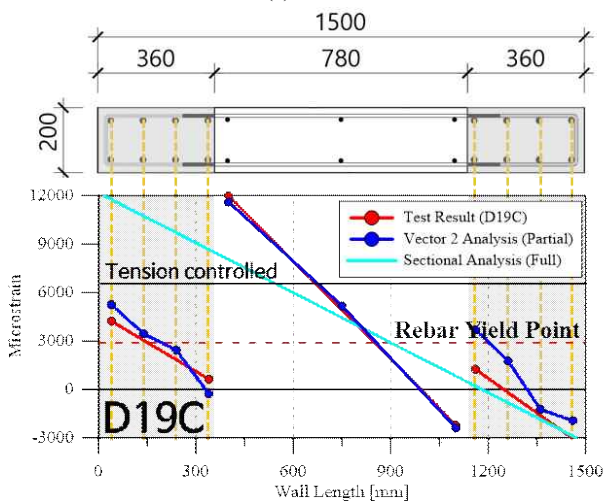
단부 철근량 증가에 따른 최외단 인장철근의 변형률 해석결과를 확인한 결과, 실험결과에서와 마찬가지로 보강량 증가에 따라 충분한 변형을 하지 못하여 변형률이 인장지배구간이 아닌 변화단면 구간에 있는 것으로 확인되었다. 이에 따라 최외단 인장철근의 변형률에 따른 연성능력을 유한요소해석결과를 바탕으로 산정해도 문제가 없을 것으로 판단된다.

3.3. 매개변수 분석

실험 결과 휨 성능에 가장 큰 영향을 끼치는 것은 보강부에 배치된 철근량이다. 전단에서는 형상비에 따른 벽체의 거동이 매우 중요하나 휨 거동에서는 일정 수준 이상의 형상비에서는 변화가 없기 때문에 본 연구에서 매개변수 분석의 주요 대상은 철근비이다.



(a) D16C



(b) D19C

Figure 6. Strain distribution

벽체의 높이에 따라 동일한 철근비더라도 파쇄길이의 영향이 있을 수 있기에 동일 형상비 및 철근비에 높이와 파쇄길이를 변화하여 추가적으로 해석을 수행하였다. 보강하는 최대철근량의 기준은 ACI 318-19에서 제시하는 반수이음되는 기둥의 최대 철근비인 4%로 설정하였다. 해석 대상이 되는 철근콘크리트 벽체의 배근과 이에 대한 각각의 철근비는 Table 1에 나타내었다.

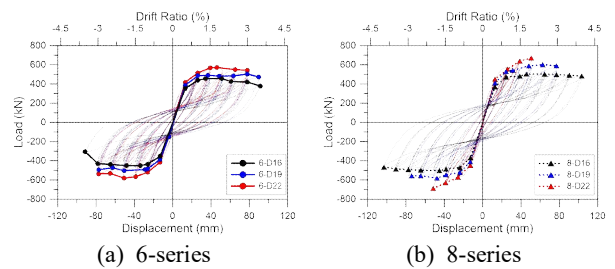
그 결과 철근비 증가에 따라 최대강도가 증가하며 연성능력이 떨어지는 것을 확인하였다. 특히 8-D22로 보강된 모델링의 경우 가장 큰 강도를 나타내었으나 최대하중 이후 갑작스런 파괴가 발생하였다. 해석결과는 Figure 7에 나타내었다.

철근비에 따른 단면의 변형률 분포를 Figure 8에서 확인한 결과, 철근비가 증가함에 따라 최외단 철근의 인장 변형률이 줄어드는 것을 확인하였다. 이에 따라 철근비에 따른 최외단 인장철근 변형률의 변화를 바탕으로 경계요소가 보강된 철근콘크리트 전단벽의 연성을 반영할 필요가 있다.

Table 1. Parametric study plan

Modeling ID	h_w (mm)	l_w (mm)	h_w/l_w	l_{ex} (mm)	Additional rebar
6-D16	2600	1500	1.73	300	6-D16
8-D16				380	8-D16
6-D19				300	6-D19
8-D19				380	8-D19
6-D22				300	6-D22
8-D22				380	8-D22

h_w : wall height, l_w : wall length, l_{ex} : excavation length



(a) 6-series

(b) 8-series

Figure 7. Load-displacement relationship by parametric study

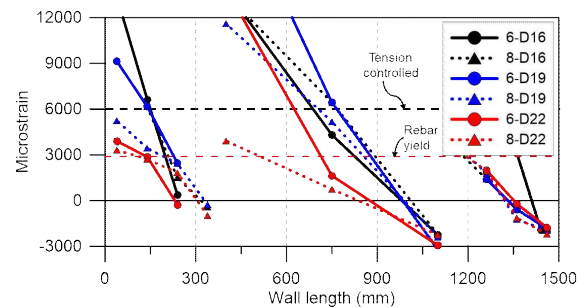


Figure 8. Strain distribution by parametric study

4. 휨 설계 모델 제안

4.1 휨 보강 설계 시 가정사항

실험결과와 해석결과를 분석한 결과 경계요소 휨 보강에 의해 벽체가 개별거동 함에 따라 중립축은 기존벽체와 보강부분에 동시에 발생하는 것을 확인하였다. 압축력을 받는 보강단부의 철근 변형률 변형률이 대부분 항복 변형률에 도달하지 않는 것을 확인하였다. 반면, 인장력을 받는 철근의 경우 분리거동에 의해 각 철근별로 변형률의 차이는 있으나 대부분 항복하는 것을 확인하는 것을 확인하였다. 또한, 보강부분에서의 중립축은 보강부분 단면적 내에 있는 것을 확인함에 따라 보강단면의 휨 설계 시 다음과 같은 가정을 할 수 있을 것으로 판단하였다. Figure 9은 가정사항을 반영한 휨 설계 모델을 제시하였다.

- 휨 강도 계산 시 일체 단면 거동을 가정한다.
- 중립축의 위치는 벽체가 개별 거동함에 따라 보정계수를 적용한다.
- 휨 강도 계산 시 인장철근은 경계요소에 집중배치된 철근을 이용하여 계산한다.
- 휨 강도 계산 시 기존 벽체의 강도기여분은 무시할 수 있다.
- 인장력을 받는 부분의 철근은 모두 항복한다고 가정한다.

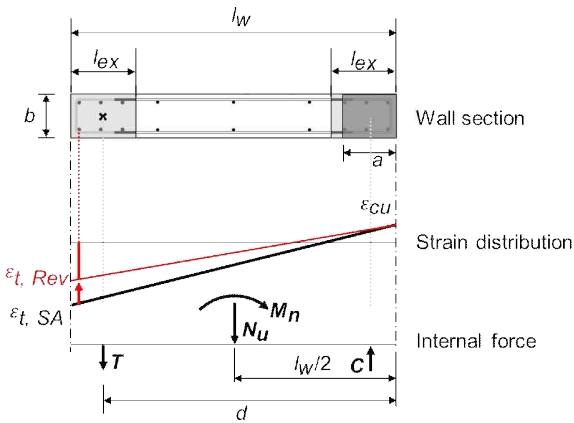


Figure 9. Flexural retrofit design model of RC shear wall

4.2 변형률 보정계수

본 연구에서는 형상비 1.5 이상의 휨 지배형 단면을 연구대상으로 설정함에 따라 경계요소 보강이 전체 벽체의 휨 성능에 영향을 끼치는 요소를 결정하였다. 이때 휨 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 경계요소의 철근비이므로 철근비에 따른 벽체의 최외단 인장철근 변형률 변화를 비로써 나타내었으며 이를 변형률 보정계수로 정의하였다.

단면해석을 통해 계산된 최외단 인장철근의 변형률은 경계요소만을 고려하여 일체거동을 가정하였으며

VecTor2 해석에 의한 최외단 인장철근의 변형률을 산정하였다. 최외단 인장철근의 변형률만을 고려하여 변형률의 깊이를 산정하면 식(1)와 같이 계산할 수 있다.

$$c_{FEA} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{t,FEA} + \epsilon_{cu}} d_t \quad (1)$$

여기서, c_{FEA} 는 해석결과에 의한 중립축 깊이, ϵ_{cu} 는 콘크리트 극한압축변형률, $\epsilon_{t,FEA}$ 는 해석결과에 의한 최외단 인장철근의 변형률, d_t 는 압축연단에서 최외단 인장철근까지의 깊이이다. 줄어드는 중립축 깊이는 단면해석결과와 비교하였으며 이를 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = \frac{\epsilon_{t,FEA}}{\epsilon_{t,SA}} \quad (2)$$

여기서, γ 는 변형률 보정계수, $\epsilon_{t,SA}$ 는 일체화된 단면의 휨해석에 의한 최외단 인장철근의 변형률이다. 이를 그래프로 나타내면 Figure 10과 같다.

보강된 수직철근비(ρ_t)의 영향을 고려한 변형률 보정계수를 산정하기 위하여 선형 회귀분석을 수행하였다. 일반적으로 철근비가 증가함에 따라 변형률은 감소하는 경향을 나타낸다. 따라서 중립축 보정계수에 대한 제안식은 선형 회귀분석을 통해 반비례의 형태로 나타내었으며 그 식은 식 (4)와 같다. 그리고 변형률 보정계수를 적용하여 수정반영된 변형률을 일반화하면 식 (5)와 같다.

$$\gamma = \frac{0.0177}{\rho_t} - 0.01 \leq 1.0 \quad (4)$$

$$\epsilon_{t,rev} = \gamma \epsilon_{t,SA} \quad (5)$$

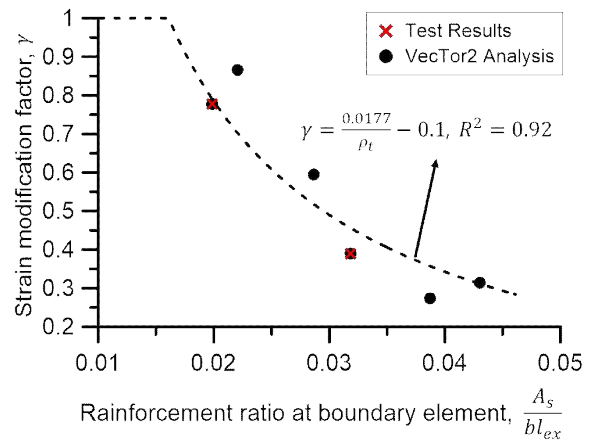


Figure 10. Strain modification factor

회귀분석 결과 결정계수 0.92를 나타내었으며 회귀분석에 대한 F값은 0.041으로 0.05를 하회하고 있기 때문에 철근비에 대한 변수는 유의한 것으로 판단된다.

추후 연구 시 철근비뿐만 아니라 경계요소 보강 시 휨 강도 및 최외단 인장철근의 변형률에 영향을 끼치는 변수에 대해 분석하여 해당 제안식을 확장할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.3 휨 보강 벽체의 강도감소계수

변형률을 통해 계산할 경우 강도감소계수가 단면해석을 통해 계산된 값에 비해 작아지게 된다. ACI 318-19에서는 인장지배단면의 강도감소계수를 0.9로 제안하고 있으며 KDS 14 20 00에서는 0.85로 설정하고 있다. 본 연구에서는 인장지배단면의 강도감소계수를 0.85로 설정하였다. 압축지배, 변화구간, 인장지배구간에서의 강도감소계수는 식 (6)~(8)을 통해 산정할 수 있으며 변형률 보정계수에 따른 강도감소계수의 변화를 Figure 11에 나타내었다. 해당 결과는 보강 철근비 증가에 따른 강도감소계수 반영 영역이 늘어나는 것을 보여주고 있다.

$$\varepsilon_{t,rev} = \gamma \varepsilon_{t,sa} < \varepsilon_y \quad \phi = 0.65 \quad (6)$$

$$\varepsilon_y \leq \varepsilon_{t,rev} < 2.5\varepsilon_y \quad \phi = 0.65 + \frac{0.2}{2.5\varepsilon_y - 0.002}(\varepsilon_{t,rev} - 0.002) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{t,rev} \geq 2.5\varepsilon_y \quad \phi = 0.85 \quad (8)$$

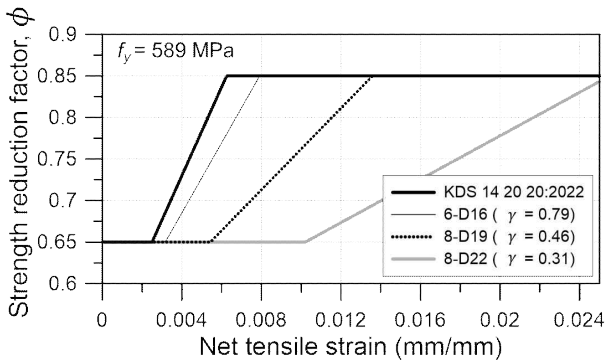


Figure 11. Strength reduction factor of flexural retrofitted wall

5. 결 론

본 논문에서는 실험결과와 비선형 유한요소해석 결과를 바탕으로 휨 보강 설계 방법에 대해 제시하였다. 휨 보강 설계법은 실무에서 사용할 수 있도록 효율적이고 간편하게 제시하였으며 충분히 안전성을 확보할 수 있도록 하였다. 이에 대한 결론을 정리하면 아래와 같다.

- (1) 본 논문에서 VecTor2를 이용하여 휨 보강 해석을 수행하였으며 그 결과 실험결과를 잘 예측하였다. 따라서 제안된 해석방법은 유효한 것으로 보인다.
- (2) 실험결과 및 유한요소해석결과를 바탕으로 휨 보강 설계 시 가정사항을 설정하였으며 제안된 가정사항을 통해 실험결과를 예측할 경우 휨 강도는 정확한 예측이 가능하나 최외단 인장철근의 변형률은 큰 차이를 보였다.
- (3) 최외단 인장철근의 변형률을 보정하기 위해 유한요소해석결과를 바탕으로 회귀분석을 수행하여 변형

률 보정계수 제안식을 도출하였다. 제안식은 통계적으로 유의미하며 정확한 변형률 예측이 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Attard, M. M., & Setunge, S. (1996). Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete. *ACI Materials Journal*, 93, 432-442.
2. Baek, E., Pohoryles, D. A., Kallioras, S., Bournas, D. A., Choi, H., & Kim, T. (2022). Innovative seismic and energy retrofitting of wall envelopes using prefabricated textile-reinforced concrete panels with an embedded capillary tube system. *Engineering Structures*, 265.
3. Choi, C. S., Bae, B. I., Bae, S., & Son, D. H. (2022). Flexural retrofit of existing reinforced concrete structural walls with various boundary element details under cyclic loading. *Journal of Building Engineering*, 52.
4. Committee ACI. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary. American Concrete Institute.
5. Eligehausen, R., Popov, E. P., & Bertero, V. V. (1983). Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations (Report No. UCB/EERC-83/23). Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
6. Kim, S. Y., Cho, U., Chung, J. H., Bae, B. I., & Choi, C. S. (2021). Seismic performance of existing RC structural walls retrofitted in flexure by wall end plate. *Sustainability*, 13.
7. Korea Concrete Institute. (2021). Design of concrete structures (strength design method) (KDS 14 20 00). Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korea. (In Korean).
8. Seckin, M. (1981). Hysteretic behaviour of cast-in-place exterior beam-column-slab subassemblies (Doctoral dissertation, University of Toronto).
9. Sun, F. J., Pang, S. H., Zhang, Z. W., Fu, F., & Qian, K. (2020). Retrofitting seismically damaged steel sections encased concrete composite walls using externally bonded CFRP strips. *Composite Structures*, 236.
10. Todut, C., Dan, D., & Stoian, V. (2015). Numerical and experimental investigation on seismically damaged reinforced concrete wall panels retrofitted with FRP composites. *Composite Structures*, 119, 648-665.
11. Vecchio, F. J. (1992). Finite element modeling of concrete expansion and confinement. *Journal of Structural Engineering*, 118, 2390-2406.