

# 철근콘크리트 벽체의 극한상태 면내 휨에 대한 고려

## Reinforced Concrete Wall under In-Plane Flexure at Ultimate State

김 장 훈\*                      김 지 현\*\*                      박 홍 근\*\*\*                      홍 성 곁\*\*\*  
Kim, Jang Hoon              Kim, Ji Hyun                      Park, Hong Kun              Hong, Sung Gul

### ABSTRACT

The determination of compressive zone at the critical section of concrete walls under in-plane flexure is important in both assessing the ductility and designing the seismic retrofit. Recognizing this, the once-predominated code approach to determine the compressive zone was advanced by considering concrete rectangular stress block parameters varying with the extreme fiber strain in compression. It is shown that the major factors influencing the magnitude of compressive zone are axial load ratio, concrete strength, longitudinal steel ratio, yield strength and the level of strain at extreme compression fiber of wall sections. The present paper closes with the discussion for the research agenda requiring further study to investigate the behavior of reinforced concrete walls.

### 1. 서론

우리나라에서는 1970년대부터 인구밀집지역을 중심으로 공동주택의 고층화가 시작되어 고층아파트먼트의 건설이 활발하게 진행되어왔다. 이 과정에서 전용면적의 극대화와 시공의 효율성을 통한 공기 단축을 위하여 고층공동주택의 구조형태는 기둥과 보가 없는 철근콘크리트 벽식 구조가 주류를 이루게 되었다. 이러한 벽식 구조의 특징은 기다란 장방형의 단면과 높은 형상비, 기둥에 비하여 상당히 적은 철근양, 기대할 수 없을 정도로 낮은 철근에 의한 콘크리트의 횡구속 효과 및 그럼에도 불구하고 작용하는 상당히 높은 축하중 등을 들 수 있다. 벽식 구조는 중력방향 하중이나 바람하중에 대하여는 경험적으로 그 구조적 성능이 입증되었다고 할 수 있지만, 최근 들어 관심이 높아질 뿐 아니라 발생가능성 또한 무시할 수 없는 지진하중에 의한 극한거동에 대하여는 알려진 바가 많지 않다. 이는 앞서 열거한 구조적 특징으로 인하여 실물크기의 전단벽 파괴실험이 수월하지 않음에 기인한다고 하겠다. 비록 국내에서 보고된 실험연구<sup>(1,2)</sup>가 있지만, 극히 제한된 여건 속에서 수행된 실험결과이므로 벽식 구조의 특성을 대표하기에는 충분치 않다. 그러므로 합리적인 가정 및 메카니즘에 근거한 이론적 연구에 의한 거동예측이 그 어느 구조부재보다 중요하다고 하겠다.

본 논문에서는 극한하중하에서 벽체의 연성확보를 위하여 고려하여야 할 면내 휨에 의한 압축영역

\* 정회원, 아주대학교 건축학과 조교수

\*\* (주)신기술진단연구원, 전 아주대학교 건축학과 석사과정

\*\*\* 정회원, 서울대학교 건축학과 조교수

결정에 대하여 벽체의 거동 및 내진 보강방안과 관련지어 논하고자 한다. 벽체의 거동을 온전히 논하기 위해서는 휨-전단 상호작용, 안정 및 면의 거동 등도 언급하여야 하지만 이에 대한 연구가 진행된 후 다른 논문에서 다루기로 하고 본 논문에서는 면내 휨에 대한 것만을 고려하고자 한다.

## 2. 벽체단면 해석모델

철근콘크리트 벽체는 면내 휨에 대하여 단면의 깊이가 깊고 각층에서 비교적 얇은 바닥판의 휨 강성에 의하여 면내 횡방향으로 지지되므로 그림 1과 같이 지반에 고정된 캔틸레버로서 간주할 수 있다. 따라서 횡하중이 작용하면 벽체의 저층부에 최대모멘트가 발생하게 되고, 횡변위의 증가와 함께 재료의 용력이 소성역으로 들어서면 극한상태에 도달하게 된다.

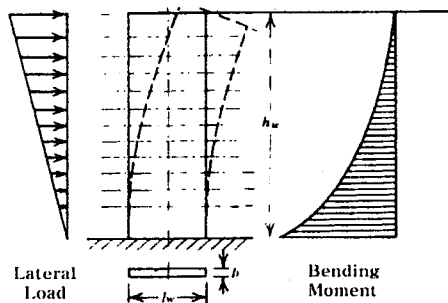


그림 1 벽체의 횡력에 대한 캔틸레버 거동<sup>(3)</sup>

면내 휨이 작용하는 극한상태하의 벽체 단면은 철근콘크리트 기둥과 같이 해석할 수 있으며 이를 묘사하면 그림 2와 같다. 여기서 벽체의 수직철근은 벽체 단면의 길이를 따라 등분포하게 배근되었고, 단면의 축방향 변형률은 단면의 길이를 따라 선형으로 분포되었다고 가정한다. 변형률의 선형분포 가정은 벽체의 깊이가 깊음으로 다소 무리가 있지만 이를 같음할만한 확실한 비선형분포 모델이 알려져 있지 않으므로 그대로 사용하기로 한다.

지금까지 묘사된 단면해석모델은 ACI 318-71에서 제안된 벽체단면의 해석모델<sup>(4)</sup>과 다를 바 없지만, 다음과 같은 면에서 더욱 발전된 모델이라고 할 수 있다. 즉 콘크리트 사각형 블록 계수를 ACI에서 제안한대로  $\alpha = 0.85$  및  $\beta = 1.09 - 0.008f'_c$  (MPa)로 고정하지 않고,  $\alpha$  및  $\beta$ 를 벽체 단면 압축연단의 최대변형률의 함수로 놓았으며, 등분포된 철근이 중립축을 중심으로 압축 또는 인장으로 항복한다고 가정하여 단면의 축방향 변형률 분포의 불확실함을 어느 정도 극복하고자 하였다. 중립축 깊이  $c$ 는 면내 휨에 의한 벽체 단면내 압축영역의 범위를 규정하여 준다. 그림 2(e)의 등분포된 철근내 응력을 보면  $c < L/2$ 일 때 압축측 철근에 의한 내력은 같은 양의 인장측 철근에 의한 내력에 의하여 상쇄되고 결국은 축방향력  $P$ 와 콘크리트 응력블럭에 의한 압축반력  $C_c$  그리고 나머지 인장측 철근에 의한 인장반력  $\Delta T_s$ 에 의하여 힘의 평형이 유지되고 있음을 알 수 있다. 물론 모멘트의 평형에는 압축 및 인장측 철근 모두 기여하고 있다. 힘의 평형조건을 이용하여 벽체 단면 전체길이에 대한 중립축 깊이의 비  $c/L$ 은 다음과 같이 구하여진다.

$$\frac{c}{L} = \frac{P/f'_c A_g + \rho_t f_y / f'_c}{\alpha \beta + 2 \rho_t f_y / f'_c} \quad (1)$$

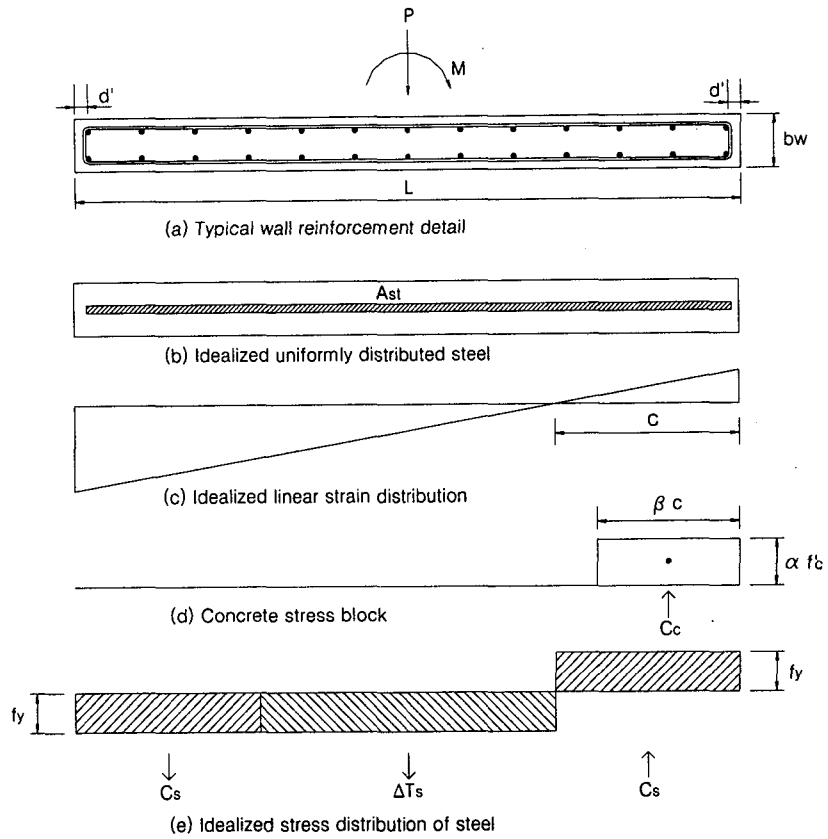


그림 2 극한상태 면내 휨에 대한 벽체 단면 해석모델

여기서  $f'_c$  및  $f_y$ 는 각각 콘크리트의 압축강도 및 철근의 항복강도이고  $A_g$ 는 벽체의 전체 단면적,  $\rho_t$ 는 벽체단면적에 대한 전체 수직철근면적의 비이며, 단위로는  $N, mm^2$ 를 사용하기로 한다. 축력비  $P/f'_c A_g$ 는 콘크리트 강도에 대한 벽체내 압축응력의 비로서 우리나라의 일반적인 고층아파트먼트를 조사한 결과가 그림 3에 정리되어 있다<sup>(5)</sup>. 전단벽의 축력비는 대개의 경우 0.05~0.2 정도이고 최대 0.4까지 분포됨을 알 수 있다. 식 (1) 및 위에 언급된 단면해석 개념은 ACI 318-71을 비롯한 여러 문

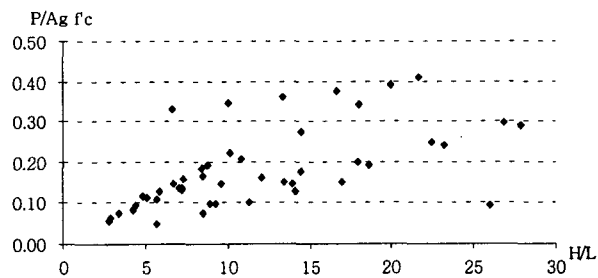


그림 3 벽체에 작용하는 축력비<sup>(5)</sup> ( $1.0D+0.25L$ )

현<sup>(3,4,6)</sup>에 인용되어 있지만, 하나같이  $\alpha$  및  $\beta$ 를 ACI의 제안대로 압축축 최대변형률을 0.003으로 고정 시켜서 구한 값을 그대로 사용하고 있다. 하지만 이론적으로  $\alpha$  및  $\beta$ 는 콘크리트의 강도 및 벽체단면 압축연단의 최대변형률  $\epsilon_c$ 에 의하여 변화하므로 본 논문에서는 벽체의 압축영역 결정에 미치는 이들 계수의 영향을 생각하여 보고자 한다.

### 3. 극한상태 휨에 의한 벽체의 압축영역 결정

콘크리트 장방향 응력블럭계수  $\alpha$  와  $\beta$ 는 다음의 두 가지로부터 결정된다: 첫째, 고려하는 압축연단 최대변형률  $\epsilon_c$ 까지 응력-변형률 관계곡선의 면적과 장방향 블록의 면적이 같아야 하고; 둘째,  $\epsilon_c$ 까지 응력-변형률 관계곡선으로 둘러싸인 면적의 원점에 대한 1차모멘트와 장방향 응력블럭의 그것과 같아야 한다. 따라서  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 구하기 위하여는 콘크리트의 적절한 거동모델이 결정되어야 하며,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 고려하는  $\epsilon_c$ 의 크기에 따라 변하게 된다. ACI에서는 설계 및 해석과정의 편의상 극한상태하에서 벽체단면의 압축연단 최대변형률을 고정시켜 놓았지만 실제로는 설계자가 특정 지진하중에 대한 벽체거동의 요구량(Demand)에 따라 정하여야 한다. 본 논문에서는 Chang and Mander에 의하여 개선된 Tsai 모델<sup>(7)</sup>을 콘크리트 거동모델로서 사용하기로 한다.

콘크리트 강도  $f'_c = 30\text{MPa}$ , 이때의 변형률  $\epsilon'_c = 0.00203$ 에 대하여 식 (1)에 의하여 계산된  $c/L$ 은 그림 4와 같다. 그림에서 보이듯이  $c/L$ 을 결정하는데 있어서 식 (1)의 여러 변수 중 축력비가 가장 결정적인 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 이에 비하여 철근양이나 콘크리트 강도에 대한 철근의 항복강도비 등의 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 하지만 축력비가 작을수록 다른 변수의

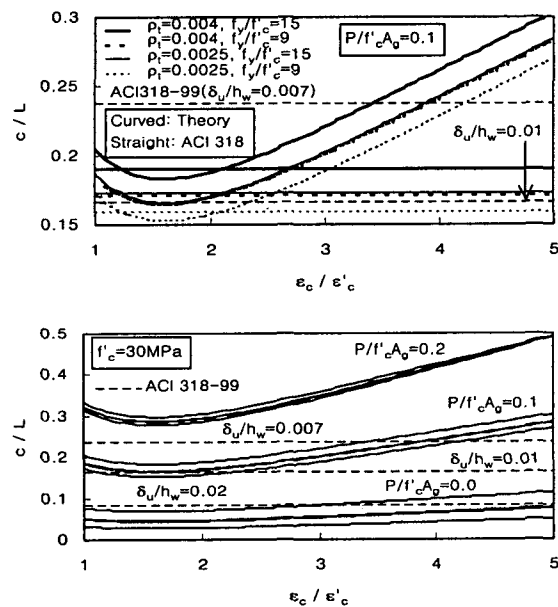


그림 4 벽체의 면내 휨에 의한 압축영역비

영향이 커지게 되는 반면,  $\alpha\beta$ 의 영향은 작아지게 된다. 아울러 최근의 ACI 318<sup>(8)</sup>에서 채택한  $c/L$ 의 결정방법은 예상되는 횡방향 변위각(Drift Angle)에 의한 것으로서 식 (1)의 변수들의 영향을 직접적으로 평가할 수 없게 되어있다. 다만 축력비가 높은 경우( $P/f_c' A_g > 0.2$ )에는 제안된 방법과 ACI 방법간의 차이가 커지게 되고, 비교적 낮은 축력하에서는 제안된 방법에 의한 것과 비슷한 변위영역이 존재함을 알 수 있다. ACI 318-99에 의하면  $c/L$ 의 범위는 0.09~0.25이다. 더욱 타당한 비교를 위하여는 식 (1)의  $c/L$ 을 벽체 상단의 횡변위와 연결하여야 하는데 모멘트면적법을 사용하면 가능하다고 생각된다. 하지만 이는 본 논문에서 다루지 않고 다른 논문에서 보이고자 한다. 식 (1)을 콘크리트 강도에 따라 정리하면, 그림 5에서 보이듯이 콘크리트의 강도가 낮을수록  $\epsilon_c$ 에 따른  $c/L$ 의 변화가 작은 것으로 나타났다.

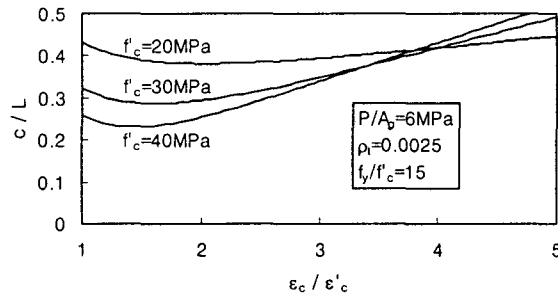


그림 5 콘크리트 강도에 따른 벽체의 압축영역비

#### 4. 내진보강에 대한 고려

콘크리트 벽체의 내진보강을 위하여 여러 가지 개념이 사용될 수 있는데 대개의 경우 횡방향 변위에 대한 연성능력확보를 배제할 수 없다. 벽체의 연성능력확보를 위하여는 압축영역내 콘크리트의 변형능력을 개선하거나 콘크리트의 역할을 대체할 수 있는 기구를 추가하여야 한다. 이를 위하여는 우선 벽체내 압축영역을 예측할 수 있어야 하는데, 이는 벽체단면내 힘의 평형조건을 이용하여  $c/L$ 을 구할 수 있음을 보여주었다. 연성확보는 휨-압축축 콘크리트의 횡구속에 의한 변형성능 향상을 통하여 도모할 수 있지만<sup>(9)</sup>, 앞서 언급한대로 벽식구조 전단벽의 구조적 특성상 단부 수직철근 및 횡방향 철근에 의한 콘크리트 성능향상을 기대하기는 어려운 형편이다. 따라서 다음으로 고려할 수 있는 연성확보 방안은 벽체 단부에 물리적으로 보강용 구조체를 추가하는 것을 생각할 수 있는데 주의를 요한다. 벽체의 양단부에 추가되는 구조체가 철과 같이 압축과 인장에 대하여 똑같이 강한 경우에는 그림 2(e)에서 보이듯이 압축부와 인장부의 응력이 상쇄되어 연성의 확보는 어렵게 되고 (즉  $c/L$ 을 감소시키지 못하고) 오히려 연성능력이 감소될 뿐이며, 모멘트강도(Strength)의 향상만을 가져오게 된다<sup>(3)</sup>. 그러므로 추가되는 구조체는 콘크리트와 같이 인장측에서보다 압축측에서 큰 힘을 발휘할 수 있어야 하겠다. 일부 실험결과로부터 벽체 양단부에 추가된 수직 철근이나 철물에 의하여 성능이 개선된 사례가 보고된바 있지만 이는 양단부 콘크리트의 압피후 저항메카니즘이 다른 것으로 전환하였거나 실제상황을 반영하지 못하는 실험여건에 기인하는 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 추후연구

본 논문에서는 고층 벽식구조 주거건물의 벽체에 횡하중이 작용할 때 벽체의 면내 휨에 의한 벽체 단면의 압축영역 결정에 대하여 생각하여 보았다. 이를 위하여 콘크리트 응력불력계수를 고려하여 압축영역을 예측하여야 함을 제안하였다. 콘크리트의 강도가 클수록 또한 축력비가 클수록 벽체 단면 압축연단 변형률에 따른 압축영역의 크기가 크게 변화함을 보여주었다. 본 연구에서는 면내 휨에 의한 영향만을 고려하였는데 전단벽체의 거동을 온전히 고려하기 위하여 전단-휨 상호작용 및 면외거동 그리고 횡좌굴의 영향에 대한 연구가 수행되어야 하겠다. 추후 연구되어야 할 과제로는 벽체 횡변위와 벽체 위험단면의 압축연단 변형률 및 압축연단과의 관계를 연구하여야 하겠다. 또한 벽체의 연성능력 향상을 위한 내진보강시 본 논문에서 제시한 간단한 방법에 의하여 효과적인 내진보강 영역의 결정 및 내진보강물의 적절한 위치선정에 대한 방법도 연구되어야 하겠다.

## 감사의 글

본 논문은 1999년 한국과학재단의 특정기초연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝히며, 이에 감사드린다.

## 참고문헌

1. 한상환, 오영훈, 이리형, "벽체 단부의 횡보강근양에 따른 변형능력의 평가", 콘크리트학회논문집, 제11권 6호, 1999년 12월, pp. 101-112.
2. 박홍근, 강수민, 조봉호, 홍성걸, "단부 횡보강근이 없는 세장한 전단벽의 내진성능", 콘크리트학회 논문집, 제12권 5호, 2000년 10월, pp. 47-57.
3. Park, R. and Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, 1975.
4. Cardenas, A.E., Hanson, J.M., Corley, W.G. and Hognestad, E., "Design Provisions for Shear Walls", *ACI Journal*, Title No. 70-23, March 1973, pp. 221-230.
5. 김지현, *철근콘크리트 전단벽의 휨에 의한 압축영역 결정에 대한 연구*, 아주대학교 대학원 건축학과, 석사학위논문, 2000년 12월.
6. 김상식, *철근콘크리트 구조설계*, 문운당, 1993.
7. Chang, G.A. and Mander, J.B., *Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns, Part I: Evaluation of Seismic Capacity*, Technical Report NCEER-94-0006, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, March 1994.
8. ACI 318-99, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, 1999.
9. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, August 1988, pp. 1827-1849.