

축력과 면내 및 면외 휨모멘트를 받는 철근콘크리트 벽체

RC Wall under Axial Force and Biaxial Bending Moments



박 홍 근*

Park, Honggun

ABSTRACT

Numerical study using nonlinear finite element analysis is done for investigating behavior of isolated reinforced concrete walls subject to combined in-plane and out-of-plane bending moments and axial force. A method for estimating the ultimate strength of wall is developed, based on the analytical results. For the nonlinear finite element analysis, a computer program addressing material and geometric nonlinearities is developed. An existing unified method combining plasticity theory and damage model is used for material model of reinforced concrete. By numerical studies, the internal force distribution in the cross section is idealized, and a new method for estimating the ultimate strength of wall is developed. According to the proposed method, variation of the interaction curve of in-plane bending moment and axial force depends on the range of the permissible axial force per unit length that is determined by the given amount of out-of-plane bending moment. As the out-of-plane bending moment increases, the interaction curve shrinks, which indicates a decrease in the ultimate strength. The proposed method is compared with an existing method using the general assumption that strain shall be directly proportional to the distance from the neutral axis. Compared with the proposed method, the existing method overestimates the ultimate strength for walls subject to low out-of-plane bending moments, and it underestimates the ultimate strength for walls subject to high out-of-plane

* 정희원, 서울대학교 건축학과 전임강사

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 1999년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

bending moments.

Keywords : biaxial bending, finite element, interaction curve, plasticity, reinforced concrete wall

1. 서론

주거용 건물의 주된 구조형식인 벽식 구조에서 철근콘크리트 벽체는 수직하중 뿐만 아니라 지진하중 또는 풍하중과 같은 횡하중을 지지하는 중요한 구조요소로 사용되고 있다. 이 수직하중과 횡하중은 벽체에 축력, 면내 휨모멘트, 면외 휨모멘트를 발생시킨다. 국내의 철근콘크리트설계기준⁽¹⁾과 ACI 318-95 기준⁽³⁾에 의하면, 축하중과 휨모멘트를 받는 벽체의 설계시 일반적인 압축재 설계방법을 따를 수 있도록 규정하고 있다. 이 설계방법은 휨변형후에도 단면의 평면이 유지된다는 가정 즉, 단면의 직각방향으로 발생하는 축방향 변형도가 중립축으로부터 떨어진 거리에 비례한다는 가정에 근거하고 있다. 현재 압축재에 대한 설계방법은 이 가정에 근거하고 있으며 압축력과 두방향 휨모멘트를 받는 벽체의 설계에도 이러한 설계방법이 쓰이고 있다.

그러나 이러한 가정은 단면의 크기가 부재의 길이에 비하여 매우 작은 기둥과 같은 선형부재에만 적용할 수 있다. 선형부재는 단면의 크기가 작으므로 외력에 의한 단면형상의 변형은 무시된다. 따라서 변형후에도 단면의 평면이 유지되어, 축방향 변형도가 중립축으로부터 떨어진 거리에 비례한다는 가정이 일반적으로 받아들여지고 있다. (Fig.1(a))

반면에 긴 단면을 갖고 있는 벽체에서는 면내 휨강성에 비하여 면외 휨강성이 매우 작다. 따라서 두방향 휨모멘트로 인하여 길이 방향 또는 그 직각방향으로부터 벗어난 각도에서 중립축이 위치할 경우, 단면의 길이 방향을 따라서 면외 휨변형을 일으킨다. 결과적으로 단면이 변형을 일으키며 평면이 유지되지 않는다. 이러한 경우 벽체를 구성하는 단위벽체의 국부 거동이 벽체의 강도를 결정할 수 있다. 예를 들어서 세장한 벽체의 압축영역에서 국부좌굴이 일어날 수 있으며 이는 벽체의 강도를 좌우할 수 있다.(Fig. 2) 이와 같이 휨변형후 단면이 평면으로 유지된다는 가정은 두방향

휨모멘트를 받는 벽체의 거동에 유효하지 않으며, 따라서 이러한 휨변형후 평면가정을 사용하고 있는 현재의 설계방법은 벽체의 강도를 평가하는 데 적절치 않다.

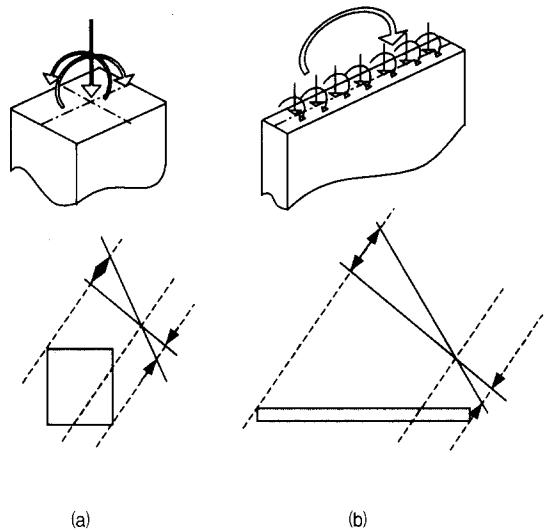


Fig.1 Assumption of Strain Distribution for Compression Members under Biaxial Bending Moments and Axial Force: (a) Reasonable Assumption for Column; (b) Unreasonable Assumption for Wall

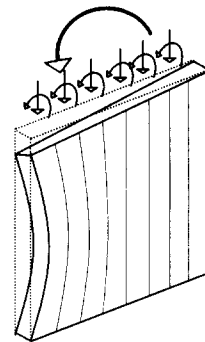


Fig. 2 Local Buckling of Slender Wall under Biaxial Bending Moments and Axial Force

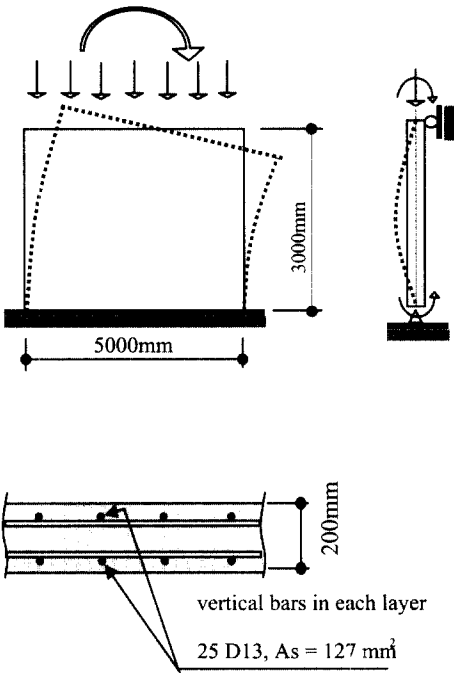


Fig. 3 Dimensions and Properties of Wall

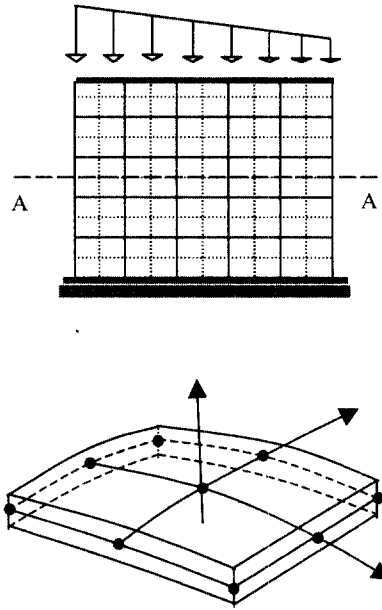


Fig. 4 Finite-Element Model of Wall and Nine-Node Shell Element

이 연구의 목적은 압축력과 두방향 휨모멘트를 받는 벽체의 강도를 평가하는 방법을 개발하는 것이다. 이 목적을 위하여 비선형 유한요소해석을 위한 수치해석 프로그램이 개발되었으며, 철근콘크리트 벽체에 대한 수치해석을 통하여 단면의 응력분포를 연구하여 새로운 강도산정법을 개발한다.

2. 수치해석방법

축방향력과 두방향 휨모멘트를 받는 철근콘크리트 벽체의 3차원 거동에 대한 연구를 위하여 재료와 기하학적 비선형을 고려할 수 있는 수치해석 프로그램을 개발하였다. 철근콘크리트의 재료모델로서 저자에 의하여 개발된 소성이론과 파괴모델의 통합방법이 사용되었다.^(2,5) 압축파괴와 인장균열의 다중파괴기준을 사용하는 이 재료모델은 철근콘크리트의 거동 특성인 인장균열에 의한 인장응력의 저하와 다축압축에 의한 압축강도의 증가현상을 동시에 나타낼 수 있다. 압축파괴기준과 인장파괴기준으로서 Drucker-Prager 모델을 사용하고 있으며, 연계유동법칙(associative flow)과

등방성경화법칙(isotropic hardening)이 사용되고 있다. 유한요소로서는 축방향력과 면내와 면외의 휨모멘트를 받는 벽체의 거동을 나타내기 위하여 9 절점의 셸요소^(4,7)를 사용하였다.(Fig. 4) 셸요소의 부피에 대한 수치적분을 위하여 면내에 9(3x3)개와 두께방향의 6개의 가우스점 등 총 54개의 가우스점을 사용하였다.

두께의 중심면과 평행한 면에 배치되어 있는 철근은 그 물성이 면내에 균등히 분포하고 있다고 가정하였다.(smeared property) 철근과의 부착에 의하여 발생하는 인장증강(tension stiffening)에 의한 콘크리트 인장응력은 철근의 배치 방향과 동일한 방향으로 발생한다고 가정하며, 철근의 응력에 조합된다.^(2,5) 수치적분을 위하여 면내에 9개의 가우스 점을 사용하였으며 따라서, 철근이 복배근으로서 수직과 수평방향으로 배치되어 있는 경우, 수치적분을 위하여 총 36개의 가우스 점을 사용하였다.

축력과 면의 휨모멘트에 의한 기하학적 비선형 효과를 고려하는 경우에는 강성행렬의 구성에서 Updated Lagrangian formulation을 사용하였다.⁽⁴⁾ 대변형(large deformation)에 의한 형태의 변화를 해석에 반영하기 위하여 셸 요소의 형태를 나타내는 각 절점의 좌표와

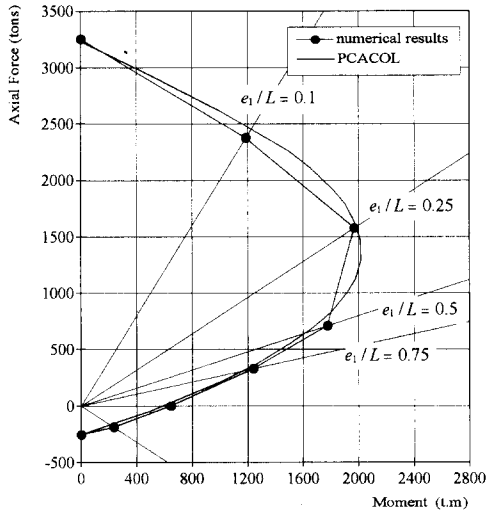


Fig. 5 Interaction Curve of In-Plane Bending Moment and Axial Force

곡면에 접하는 평면에 대한 직각방향벡터는 해당절점의 변위에 의하여 계속하여 수정된다. 비선형 해석방법은 참고문헌 [2]와 [5]에 자세히 나타나 있다.

3. 수치해석연구

3.1 벽체의 유한요소모델

Fig. 3의 벽체의 해석모델은 일반적으로 국내에서 흔히 사용되는 벽체의 형상 및 보강형태를 나타내고 있다. 벽체의 크기는 길이 5 m, 높이 3 m, 두께 20 cm 이다. 벽체의 하단은 면외 방향의 힘을 제외한 모든 방향으로 지지되어 있으며, 상단은 면의 직각방향으로 지지되어 있다. 철근은 상하방향으로 총 50 개의 D13 ($A_s = 1.27 \text{ cm}^2$) 철근이 등 간격의 복배근으로 배치되어 있으며 (철근비 = 0.0063), 역시 좌우방향으로도 같은 철근비의 보강근이 복배근으로 배치되어 있다. 피복두께는 2 cm 를 사용하였으며, 콘크리트의 강도는 300 kg/cm^2 , 철근의 항복강도는 4000 kg/cm^2 를 사용하였다.

해석모델의 유한요소분할은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 121개의 절점, 25개의 9절점 쉘요소, 그리고 모델의 상단에 위치한 10개의 보 요소로서 구성되어 있다. 축력과 면외 휨모멘트는 벽체의 길이를 따라 상단에 등 분포된다. 벽체의 강도에 대한 전단력의 영향을 없

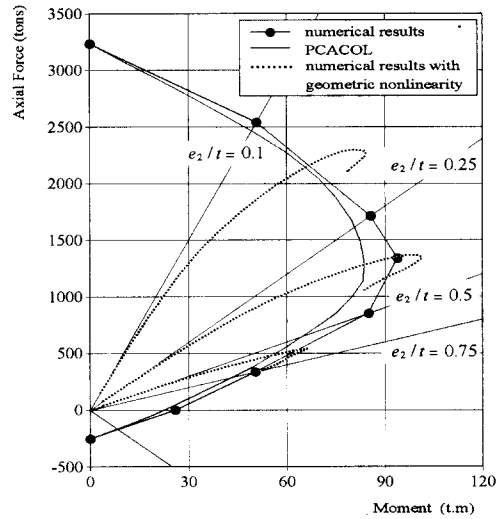
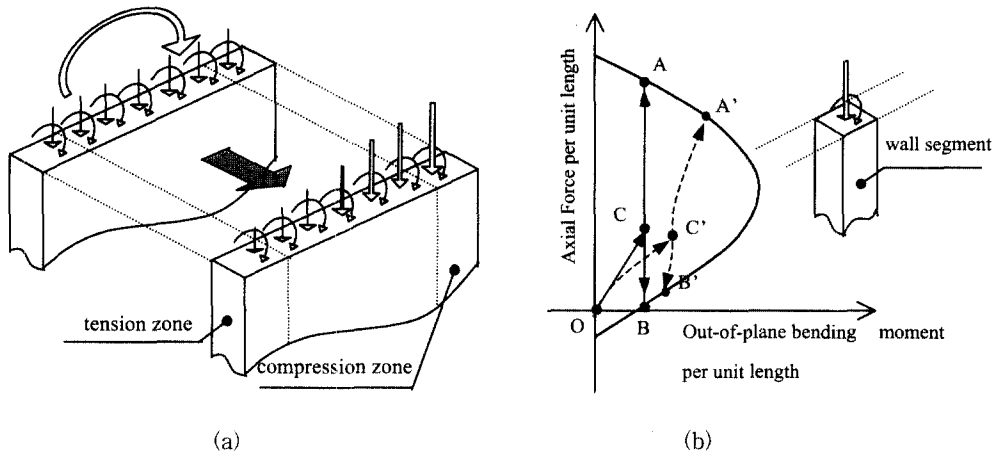


Fig. 6 Interaction Curve of Out-of-Plane Bending Moment and Axial Force

애고 벽체의 높이에 걸쳐 일정한 면내 휨모멘트를 유지하기 위하여, 횡력을 부하하는 대신에 면내 휨모멘트를 벽체의 상단에 직접 부하한다. 면내 휨모멘트는 벽체의 길이를 따라 선형으로 변화하는 수직방향의 분포하중의 형태로 해석모델의 상단에 위치한 가상의 보 부재를 통하여 벽체에 전달된다. 이 보 부재는 보의 축 방향과 벽체의 면내 휨 방향에 대하여 무한강성을 갖고 있어서 벽체에 국부응력을 일으키지 않으면서 선형의 분포하중을 면내 휨모멘트의 형태로 벽체에 전달하는 역할을 한다.

3.2 축력과 한방향 휨모멘트를 받는 벽체

본 연구에서 제시한 해석방법을 검증하고, 두방향 휨모멘트를 받는 벽체에 대한 기초연구로서, 축력과 한방향 휨모멘트를 받는 벽체에 대한 수치해석연구를 실시하였다. Fig. 5는 축력과 면내 휨모멘트의 상호관계곡선(interaction curve)을, Fig. 6은 축력과 면외 휨모멘트의 상호관계곡선을 나타내고 있다. 해석모델의 검증을 위하여 해석결과를 압축재 설계 소프트웨어인 PCACOL⁽⁶⁾에 의한 상호관계곡선과 비교하였다. PCACOL의 상호관계곡선의 산정에 있어서 압축영역의 응력분포는 포물선을 가정하였으며 콘크리트의 압축강도로서 f'_c 를 사용하였다. 이 그림에서 + 부호는 압축력을, - 부호는 인장력을 나타낸다.



loading path		description
nonslender member	slender member	
O → C	O → C'	External compressive force and out-of-plane bending moment
C → A	C' → A'	Additional compressive force due to in-plane bending moment in compression zone
C → B	C' → B'	Additional tensile force due to in-plane bending moment in tension zone

Fig. 7 Wall Segments Subject to Out-of-Plane Bending Moment and Axial Force: (a) Additional Axial Force Induced by In-Plane Bending Moment; (b) Loading Path of Internal Force in the Interaction Curve of Out-of-Plane Bending Moment and Axial Force

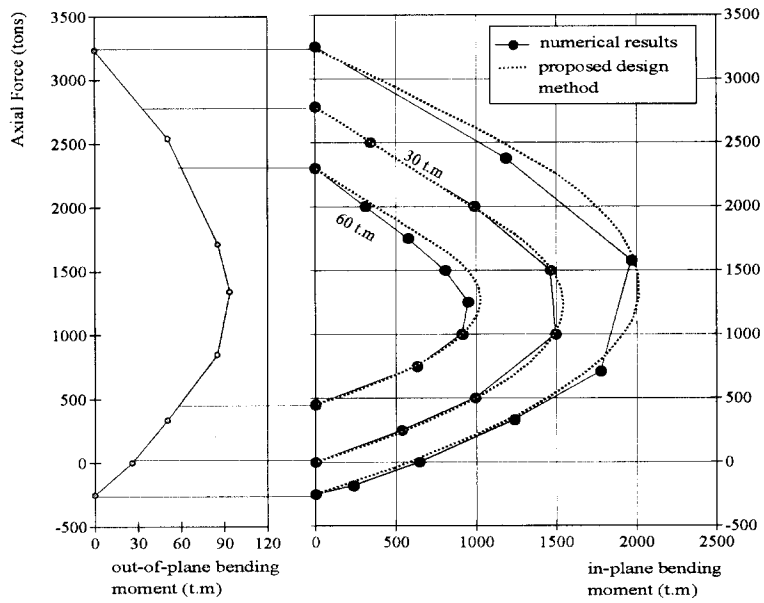
이 그림에서 나타난 바와 같이 면내 휨모멘트에 대해서는 수치해석결과가 PCACOL의 상호관계곡선과 비교적 일치하였으며, 면외 휨모멘트에 대해서는 상호관계곡선의 평형변형도(balanced strain)에서 해석결과가 강도를 다소 과대평가하고 있다. 또한 Fig. 6은 면외방향의 세장효과를 고려한 수치해석결과를 보여주고 있다. 기하학적 비선형을 고려할 경우 압축력의 증가에 따라 면외 휨모멘트가 증가되는데, 이는 비선형의 편심율(e_2/t)로서 나타나며, 기하학적 비선형을 고려치 않았을 경우의 선형의 편심율과 대비되고 있다.

3.3 축력과 두방향 휨모멘트를 받는 벽체

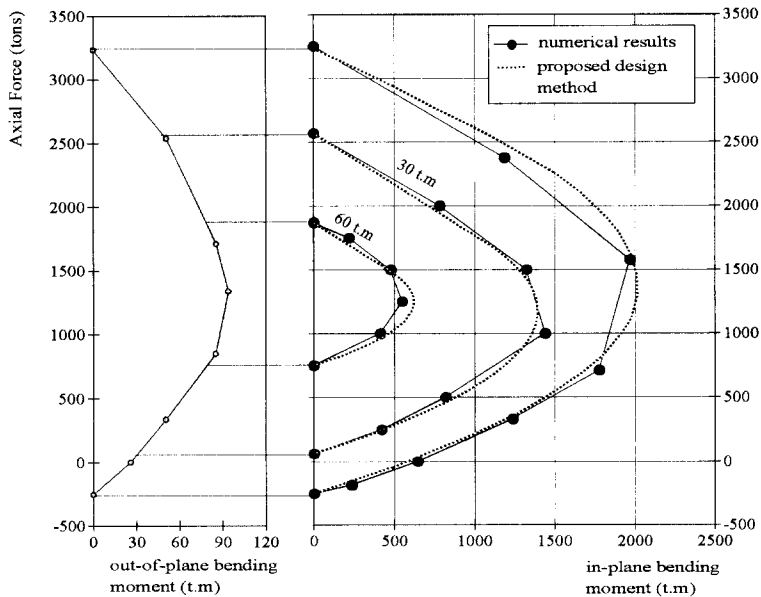
벽체에 축력과 두방향 휨모멘트가 부하될 때 단위 길이의 벽체에 발생하는 응력의 경로에 대한 개념이 Fig. 7에 설명되어 있다. 길이에 따라 등분포된 축력과 면외 휨모멘트를 가한 후 면내 휨모멘트를 작용시키

면, 각각의 단위길이의 벽체(이하 단위벽체)에는 면내 휨모멘트에 의한 압축력 또는 인장력이 발생하며 이는 기존의 등분포 축력에 추가된다. (Fig. 7(a)) 따라서 각각의 단위벽체는 축력과 면외 휨모멘트를 받는 압축재 또는 인장재로 이상화할 수 있다.

이 단위벽체에 발생하는 응력의 경로는 Fig. 7(b)의 단위벽체에 대한 축력과 면외 휨모멘트의 상호관계곡선에 나타나 있다. 우선, 압축력과 면외 휨모멘트에 의하여 응력은 O에서 C점으로 이동한다. 면외 휨모멘트가 일정하다면, 면내 휨모멘트에 의하여 압축력이 증가하는 벽체의 압축영역에서 상호관계곡선의 응력경로는 C에서 A 방향으로 이동한다. 반면, 면내 휨모멘트에 의하여 인장력이 발생하여 압축력이 감소하는 벽체의 인장영역에서 상호관계곡선의 하중경로는 C에서 B 방향으로 이동한다. 따라서 각 단위벽체의 하중경로는 A-B 사이에 존재하며 최대값은 A로 최소값은 B로 제한된다. 이때 면외 휨모멘트의 크기에 상관없이 점 A는 상호관계곡선의 압축지배영역(range of



(a)



(b)

Fig. 8 Variations of Interaction Curve of In-Plane Bending Moment and Axial Force with Out-of-Plane Bending Moments:
 (a) in cases when Slenderness Effect is Not Included; (b) in cases when Slenderness Effect is Included.

compression control)에 속하며 점 B는 인장지배영역(range of tension control)에 속함을 알 수 있다. 인장영역의 응력이 B에 도달하기 전에 압축영역의 응력이 A에 도달하면 콘크리트의 압축파괴가 벽체의 강도를 좌우하며, 반대로 인장영역의 응력이 B에 먼저 도달하면 철근의 항복이 벽체의 강도를 좌우한다.

세장한 벽체에서는 압축력의 증가에 따라 면의 휨모멘트가 증가된다. 따라서 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 단위벽체의 응력경로는 점 C'로부터 비선형 곡선의 경로인 A'-B' 사이에 존재하며 최대값은 A'으로 최소값은 B'으로 제한된다. 여기서 A'과 B'의 휨모멘트는 해당 단위벽체에 부하되는 압축력과 면내 휨모멘트에 의한 부가 압축력을 합한 총압축력에 의하여 영향을 받는 휨모멘트라는 사실에 주목할 필요가 있다. 일반적으로 세장한 압축재의 설계에서 휨모멘트의 증가계수 산정시 외압축력(external compressive force)에 의한 영향만을 고려한다. 그러나 벽체와 같이 긴장방향의 단면에서는 면내 휨모멘트에 의하여 압축영역에 압축력이 부가된다. 따라서 단위벽체의 면의 휨모멘트 산정시 외압축력에 면내 휨모멘트에 의하여 부가된 압축력을 합한 총 압축력의 영향이 고려되어야 한다. 이 압축력의 영향으로 면의 휨모멘트가 증가하며 따라서 압축영역에서 단위벽체의 강도는 일반적인 압축재 설계법에 의하여 산정된 강도보다 감소되며 벽체의 강도도 저감된다.

위에서 설명한 벽체의 응력발생경로를 검증하기 위하여 다음과 같은 수치해석연구를 실시하였다. 다양한 크기의 압축력에 대하여 일정한 면의 휨모멘트인 $60 t \cdot m$ (단위길이당 $12 t \cdot m / m$) 또는 $30 t \cdot m$ (단위길이당 $6 t \cdot m / m$)를 가한 후 면내 휨모멘트를 증가 시켜 벽체의 강도를 구하였다. Fig. 8(a)는 세장효과를 고려치 않은 해석결과를, Fig. 8(b)는 세장효과를 고려한 해석결과를 나타내며, 면의 휨모멘트의 크기변화에 따른 축력과 면내 휨모멘트의 상호관계곡선의 변화양상을 보여주고 있다. 이 상호관계곡선의 전체적인 형상은 일반적인 상호관계곡선의 형상을 따르고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 면의 휨모멘트가 증가할수록 단위벽체의 허용 압축력범위가 감소되며, 결과적으로 상관관계곡선의 축소를 일으킨다. 세장효과를 고려한 경우에는 증가된 면의 휨모멘트의 영향으로 단위벽체의 허용 압축력범위가 감소되어 더욱 축소한 상관관계곡선을 나타내고 있다.

Fig. 9는 보다 구체적으로 세장효과를 고려치 않은 경우에 대하여 벽체의 단위길이당 축력분포를 나타내

고 있다. 이 단위길이당 축력은 벽체의 중간높이(Fig. 4의 A-A 단면)의 각 가우스점에서의 값이다.

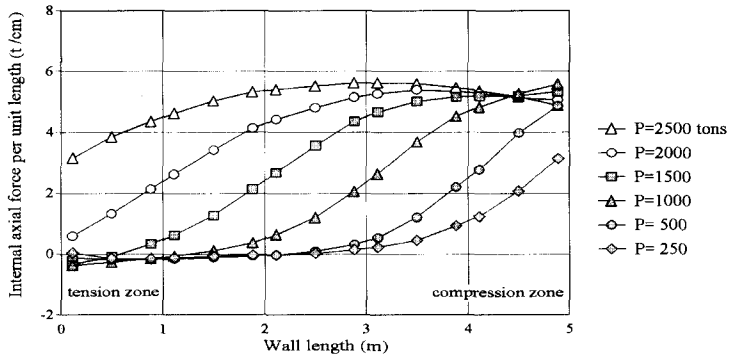
Fig. 9(a)에 나타난 바와 같이 면의 휨모멘트가 $30 t \cdot m$ (단위길이당 $6 t \cdot m / m$)인 경우 단위길이당 축방향 응력은 면의 휨모멘트의 상호관계곡선에서 제한된 최대 및 최소 값인 $5.56 t/cm$ (총 압축력 = $2780 tons$, 단위길이당 압축력 = $2780 tons / 500 cm = 5.56 t/cm$) 과 $0 t/cm$ (총 압축력 = $0 tons$)을 초과하지 못한다. 또한 Fig. 9(b)의 면의 휨모멘트가 $60 t \cdot m$ (단위길이당 $12 t \cdot m / m$)인 경우 단위길이당 축방향 응력은 면의 휨모멘트의 상호관계곡선에서 제한된 최대 및 최소 값인 $4.6 t/cm$ (총 압축력 = $2300 tons$, 단위길이당 압축력 = $2300 tons / 500 cm = 4.6 t/cm$)과 $0.9 t/cm$ (총 압축력 = $450 tons$, 단위길이당 압축력 = $450 tons / 500 cm = 0.9 t/cm$)을 초과하지 못한다. 앞에서 언급한 바와 같이 벽체의 단위길이당 축방향 응력은 면의 휨모멘트에 의하여 제한된 최대 및 최소 축력을 초과할 수 없음을 알 수 있다.

그림에 나타난 응력분포의 특징으로서 압축영역의 축력분포는 압축 단의 압축력을 최대값으로 하는 포물선의 형태를 나타내며 인장 단으로 이동할수록 축력이 감소한다. 이 축력이 최소값에 도달한 경우에는 이 최소 축력으로 일정한 값을 나타낸다. 이는 최소 축력에 도달한 후에는 변형도의 증가에도 불구하고 축력이 일정하며 비교적 큰 연성도를 나타낸다는 것을 의미한다. 앞서 기술한 바와 같이 최소축력은 면의 휨모멘트의 상호관계곡선에서 인장지배영역에 속한다. 인장지배영역에서는 철근의 항복이 콘크리트의 압축파괴보다 먼저 일어나므로 비교적 큰 연성도를 나타내며, 철근의 항복 후 거의 일정한 강도를 유지한다.

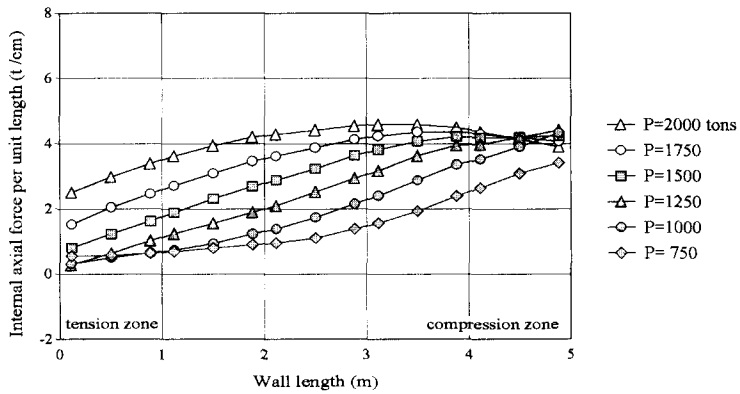
4. 강도산정법의 제안

4.1 강도산정법

응력의 정확한 분포는 해당 변형도의 분포와 일치하여야 하지만, 변형도에 대한 응력의 분포를 정확히 예측하기 위해서는 복잡한 계산과정이 필요하다. 따라서 설계 실무에서 사용할 수 있는 보다 간편한 강도산정법이 요구된다. 본 연구에서 해석모델로서 사용한 벽체와 같이 철근이 벽체의 길이를 따라 균등히 배치되어 있고 철근비가 작은 경우에는 Fig. 9의 해석결과를 바탕으로 Fig. 10에 나타난 바와 같은 단면의 길이

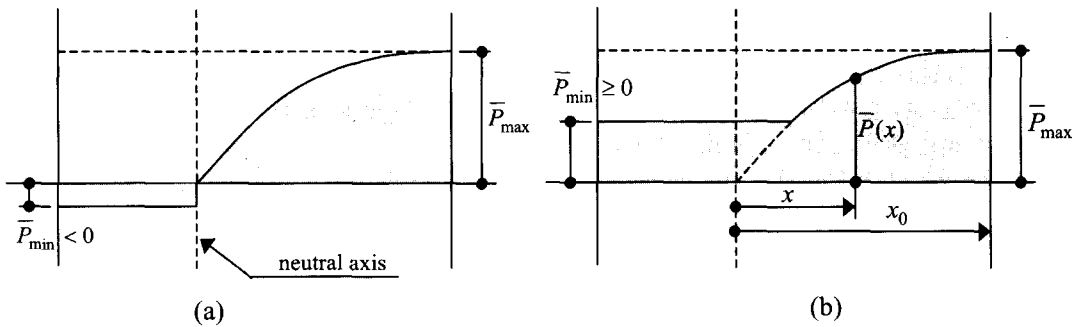


(a)



(b)

Fig. 9 Profile of Distributed Internal Axial Force: (a) Out-of-Plane Bending Moment = 30 t·m (6 t·m/m);
 (b) Out-of-Plane Bending Moment = 60 t·m (12 t·m/m)



(a)

(b)

$$\bar{P}(x) = \bar{P}_{\max} \left[2 \left(\frac{x}{x_0} \right) - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2 \right] \geq \bar{P}_{\min}$$

Fig. 10 Profile of Idealized Internal Axial Force: (a) $\bar{P}_{\min} < 0$; (b) $\bar{P}_{\min} \geq 0$

방향에 대한 축력 분포를 이상화할 수 있다. 압축영역의 응력분포는 압축 단의 최대응력을 기준으로 포물선의 형태를 가정하며, 압축강도 \bar{P}_{max} 는 단위벽체에 대한 축력과 면의 휨모멘트의 상호관계곡선에서 주어진 최대값이다. 축 방향력 $\bar{P}(x)$ 는 중립축으로 이동할수록 감소하며, 인장영역에서는 면의 휨모멘트의 상호관계곡선에서 주어진 최소 축력값인 \bar{P}_{min} 으로 일정하다. 압축영역에서도 축력이 최소 축력에 도달한 경우에는 그 최소 값으로 일정하다.

이 연구에서 제안하는 벽체의 강도산정법은 위에서 설명한 이상화된 축력분포를 사용하고 있으며 이 방법의 구체적인 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 단위벽체에 대한 축력과 면의 휨모멘트의 상호관계곡선을 그린다.
- 2) 이 상호관계곡선에서 면의 휨모멘트에 대한 허용 최대축력 및 최소축력을 구한다. (Fig. 11(a)) 이때 최대축력은 상호관계곡선의 압축지배영역에 최소축력은 인장지배영역에 존재한다.

3) 세장효과를 고려하여야 하는 경우, 최대축력과 최소축력은 면의 휨모멘트를 증가시키지만, 상호관계곡선상에서 최대 및 최소축력들도 증가된 면의 휨모멘트에 해당되는 축력과 일치하여야 한다. 따라서 상호관계곡선에서 면의 휨모멘트에 해당하는 최대축력과 최소축력을 구하기 위한 반복계산이 필요하다.

4) 하나의 중립축 위치에 대하여 Fig. 10에 나타난 바와 같은 축력분포를 이상화하여 단면의 중심축에 대하여 축력과 면내 휨모멘트를 계산한다.

5) 중립축을 이동하면서 4)의 과정을 반복 수행하여 Fig. 11(b)과 같은 축력과 면내 휨모멘트의 상호관계곡선을 산정한다.

4.2 수치해석 결과와의 비교

Fig. 8 에는 이 강도산정법에 의한 상호관계곡선이 수치해석결과와 비교되어 있다. 강도산정법에서 사용된 최대축력 및 최소축력은 유한요소해석에서 얻은 결과이다. Fig.7(b)에 나타난 바와 같이 이 값들은 일정

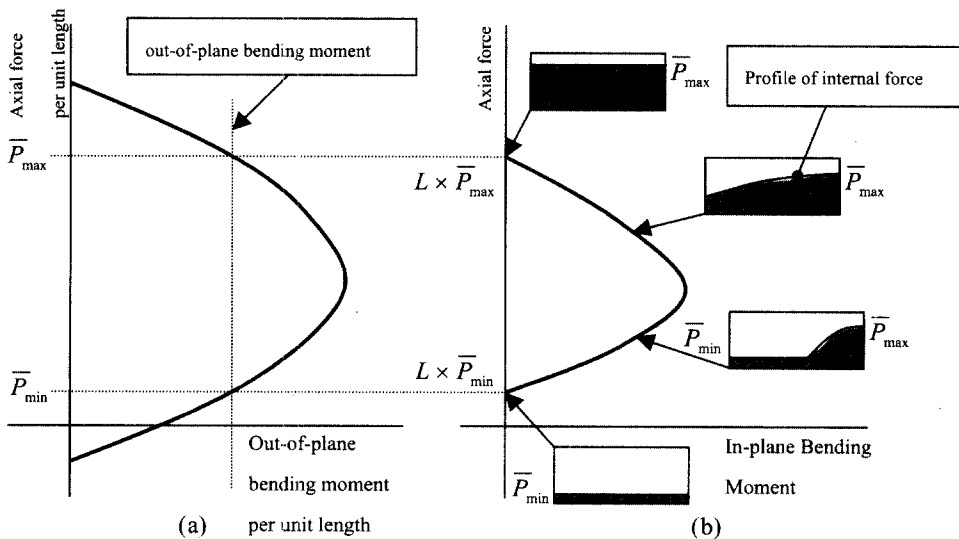


Fig. 11 Proposed Method for Estimating Ultimate Strength of Wall: (a) Potential Maximum and Minimum Axial Forces Defined in the Interaction Curve of Out-of-Plane Bending Moment and Axial Force; (b) Interaction Curve of In-Plane Bending Moment and Axial Force

한 면의 휨모멘트에 대하여 축력을 극한강도까지 증가하거나 감소하여 구할 수 있다. Fig. 8(a) 와 (b)에 나타난 바와 같이 세장효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 이 강도산정법에 의한 상호관계곡선과 수치해석결과가 일치된 결과를 나타내고 있다.

4.3 기존의 강도산정법과의 비교

Fig. 12 (a) 와 (b)는 이 연구에서 제안한 강도산정법을 이용한 상호관계곡선과 PCACOL⁽⁶⁾에 의한 상호관계곡선을 비교하고 있다. PCACOL은, 단면에서 변형도의 크기가 중립축으로부터 떨어진 거리에 비례한다는 일반적인 가정을 사용하고 있다. 본 연구에서 제안한 강도산정법에서 사용하는 축력과 면외 휨모멘트의 상호관계곡선은 PCACOL를 이용하여 구한 것이다. Fig. 12(a)는 세장효과를 고려치 않는 경우에 대한 상호관계곡선이며 Fig. 12(b)는 세장효과를 고려한 경우의 상호관계곡선이다. 세장효과를 고려하는 경우에는 다음과 같은 국내 철근콘크리트 계산규준⁽¹⁾의 모멘트 증가계수를 사용하였다.

$$\delta = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{P_c}} \geq 1.0 \quad (1)$$

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(k l_u)^2}$$

여기서 다음과 같은 상수를 가정한다. $C_m = 0.4$, $k = 0.8$, $l_u = 4.0 \text{ m}$, $EI = 0.4 E_c I_g$, $E_c = 15000\sqrt{f_c}$. 이상의 상수를 사용하면 P_c 는 약 3400 tons (6.8 t/cm)이다. PCACOL을 사용할 경우 P_u 는 외력에 의한 압축력을 나타낸다. 반면에 이 연구에서 제시하는 강도산정법을 사용할 경우 모멘트 증가계수는 압축 단의 단위벽체에에서 계산되며, 이때 P_u 는 증가된 면외 휨모멘트에 해당되는 최대축력으로서 면외 휨모멘트의 상호관계곡선에서 정의된다.

Fig. 12(a)에 나타난 바와 같이 이 연구에서 제시하는 강도산정법에 비하여, PCACOL은 면외 휨모멘트가 작은 범위에서는 강도를 과대평가하고 있으며, 면외

휨모멘트가 큰 범위에서는 강도를 과소평가하고 있다. Fig. 12(b)에 나타난 바와 같이 세장효과를 고려하는 경우에는 압축력이 큰 영역에서 두 결과가 더욱 큰 차이를 보이고 있다. 일반적인 압축재 설계법을 사용하고 있는 PCACOL에서는 외압축력이 2000 tons 이하에서는 모멘트 증가계수가 1.0이 되므로 세장효과가 나타나지 않는다. 그러나 이 연구에서 제시하는 방법에서는 압축 단의 단위벽체에 작용하는 압축력의 크기가 면내 휨모멘트에 의하여 부가되므로, 이 압축력에 의하여 증가된 면외 휨모멘트는 PCACOL의 결과보다 증가한다. 따라서 Fig. 12(b)에 나타난 바와 같이 외압축력이 2000 tons이하에서도 세장효과가 나타나며 보다 축소된 상호관계곡선을 형성한다.

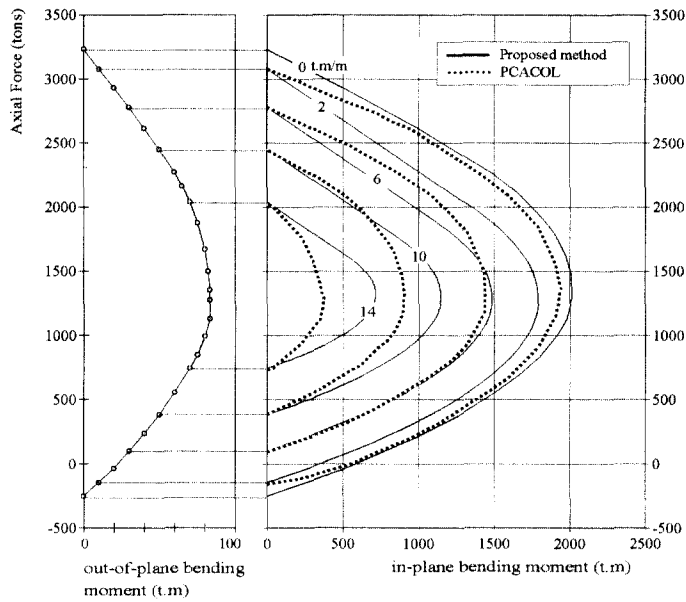
5. 결론

축력과 면내 및 면외의 두방향 휨모멘트를 받는 벽체의 3차원 거동을 연구하기 위하여 재료 및 기하학적 비선형 유한요소해석을 수행할 수 있는 수치해석 프로그램을 개발하였다. 이 유한요소해석을 위하여 셸 요소가 사용되었으며, 철근콘크리트의 재료모형을 위하여 소성이론과 파괴모델의 통합모형을 사용하였다.

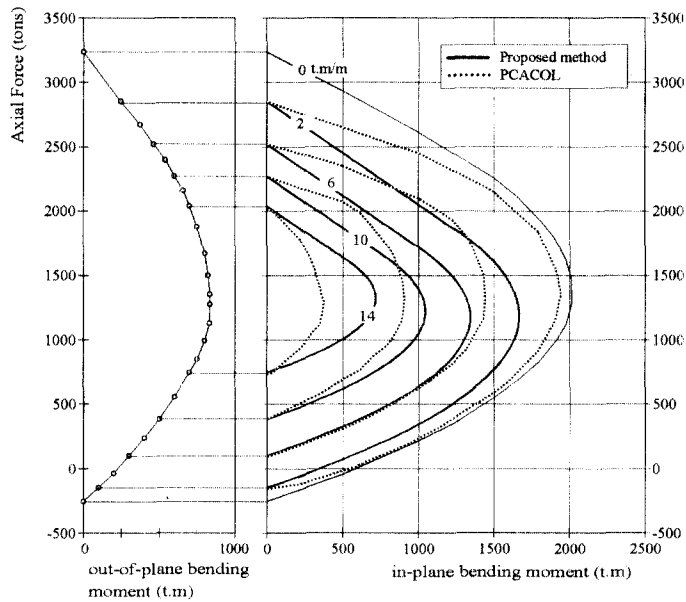
벽체단면의 축방향 응력분포를 조사하기 위하여 수치해석연구를 진행하였다. 수치해석결과 다음과 같은 사항들을 발견하였다. 1) 단위벽체의 허용 축력범위는 면외 휨모멘트 크기에 의하여 결정된다. 2) 단위길이당 허용되는 최대축력과 최소축력은 축력과 면외 휨모멘트의 상호관계곡선에 의하여 구할 수 있다. 3) 최대축력은 압축지배영역에 그리고 최소축력은 인장지배영역에 속한다.

수치해석결과를 바탕으로 벽체단면의 응력 분포를 이상화하였으며 이를 이용하여 새로운 강도산정법을 개발하였다. 이 강도산정법에 따르면 면외 휨모멘트의 크기가 단위길이당 축력의 허용 범위를 결정하며, 이 단위길이당 축력범위에 따라서 총 축력과 면내 휨모멘트의 상호관계곡선이 결정된다. 면외 휨모멘트가 증가할수록 상호관계곡선이 축소되며 이는 극한강도의 감소를 가리킨다.

이 강도산정법과 보편적으로 사용되고 있는 휨변형 후 평면 가정을 사용하는 기존의 방법을 비교하였다. 그 결과 이 연구에서 제시하는 방법에 비하여 기존의 방법은 면외 휨모멘트가 작은 범위에서는 강도를 과대평가하며, 면외 휨모멘트가 큰 범위에서는 강도를 과소평가한다. 세장효과를 고려하는 경우에는 압축력이



(a)



(b)

Fig. 12 Comparison of Interaction Curves by Proposed Method and by PCACOL: (a) in cases when Slenderness Effect is Not Included; (b) in cases when Slenderness Effect is Included.

큰 영역에서 두 결과가 더욱 큰 차이를 보이고 있다. 새로운 강도산정법은 기존의 방법이 고려할 수 없는 압축 단의 국부좌굴을 고려할 수 있다.

본 연구에서 제시한 방법은 철근비가 작고 철근이 벽체의 길이를 따라 균등히 배치되어 있는 벽체에 대한 강도산정법으로서 이외의 조건을 갖는 벽체의 강도산정을 위해서는 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 대한건축학회, "극한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조계산규준 및 해설", 1994, pp. 68-76, pp.121-124.
2. 박홍근, "통합방법을 이용한 철근콘크리트부재의 비선형 유한요소해석", 한국콘크리트학회지, 제9권 제2호, pp.133-144.
3. American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95), 1995, pp.118-121, pp.227-230.
4. Bathe, K. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall Inc., 1982.7.
5. Park, H. and Klingner, R. E., "Nonlinear Analysis of RC Members Using Plasticity with Multiple Failure Criteria", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.123, No.5, pp.643-651.
6. Portland Cement Association, PCACOL, Strength Design of Reinforced Concrete Column Sections, 1992.
7. Weaver, Jr., W. and Johnston, P. R., Finite Elements for Structural Analysis, Prentice-Hall Inc., 1984.

요 약

축력과 면내 및 면외의 두방향 휨모멘트를 받는 철근콘크리트 벽체에 대한 비선형 해석연구를 수행하였으며, 해석결과를 분석하여 벽체의 강도산정법을 유도하였다. 비선형 해석연구를 위하여 철근콘크리트 벽체에 대한 재료 및 기하학적 비선형 해석을 수행할 수 있는 유한요소 해석방법을 개발하였다. 철근콘크리트의 재료모델로서 소성이론과 파괴모델의 통합모델을 사용하였다. 철근콘크리트 벽체에 대한 해석결과를 토대로 단면의 응력분포를 이상화하였으며, 이를 이용하여 새로운 강도산정법을 개발하였다. 이 방법에 따르면, 면외 휨모멘트에 의하여 단위길이의 벽체가 지지할 수 있는 축력이 결정되며, 이 허용 단위 축력에 따라서 총 축력과 면내 휨모멘트의 상호관계곡선이 결정된다. 면외 휨모멘트가 증가할수록 축력과 면내 휨모멘트의 상호관계곡선이 축소되며 이는 벽체 강도의 감소를 가리킨다. 이 새로운 방법을, 휨변형후에도 단면이 평면으로 유지된다는 가정을 사용하는 기존의 강도산정법과 비교한다. 이 비교 결과에 따르면, 새로운 방법에 비하여 기존의 방법은 면외 휨모멘트가 작은 영역에서 벽체의 강도를 과소평가하며, 면외 휨모멘트가 큰 영역에서는 벽체의 강도를 과대평가한다.

(접수일자: 1998.6.20)