

선형요소를 사용하여 판넬존 변형을 고려한 해석 모델

The Analytical Model Considering the Deformation of Panel Zone with Linear Element

조 소 훈*
Cho, So-Hoon

박 찬 현**
Park, Chan-Hun

이 동 근***
Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

As the structure is taller and its member is larger, the effect of the deformation of panel zone on the displacement of structure becomes larger. The analysis using the centerline dimensions in the steel moment frame structure can not consider the accurate effect of panel zone. And the finite element analysis using infinitesimal solid and shell element is impractical for the total tall building structure. Therefore, this paper proposes the analytical model using linear element in order to be able to evaluate the reasonable deformation of panel zone. the proposed analytical model makes the analysis of the building structure simple and ease, because it uses the only linear elements. In addition, it can easily incorporate the various parameters affecting the deformation of panel zone. In order to prove the validith of the proposed analytical model, the analysis result using the proposed analytical model is compared with the result using finite element analysis with shell element.

1. 서론

현재 선형요소를 사용하여 철골 모멘트 골조를 해석하는 경우 중심선 치수로 표현되는 골조를 사용하거나 보와 기둥이 교차되는 판넬존 부분을 rigid zone 요소를 이용하여 해석하는 것이 일반적이다. 그런데 중심선 치수로 표현되는 골조를 사용하여 해석한 경우, 판넬존 부분의 효과를 전혀 반영하지 못하여 실제 변위보다 더 큰 값을 나타내게 되고, 판넬존 부분을 완전히 rigid zone으로 가정할 경우, 판넬존 부분의 변형을 전혀 반영하지 못함으로써 실제 변위보다 더 작은 값을 나타낸다. 특히 건물의 층수가 높아짐에 따라 철골 부재의 크기가 커지게 되고, 철골 부재가 커질수록 철골 판넬존의 변형이 철골 모멘트 저항 골조의 횡방향 변위에 미치는 영향은 더 커지게 되므로, 고층 건물에서는 판넬존의 변형을 합리적으로 구하는 것이 보다 중요해진다.

철골 모멘트 골조의 판넬존 변형을 간략하게 근사적으로 해석하는 방법들에 관한 많은 연구들이 있었는데,

* 성균관대학교 건축공학과 박사후 연구원, 공학박사, keystone@hanmail.net

** 성균관대학교 건축공학과 석사과정

*** 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 교수, 공학박사

판넬존의 변형을 고려할 수 있는 간단한 해석모델들은 주로 선형부재인 보와 기둥의 자유도와 일치할 수 있는 자유도를 사용하는 요소들이 사용되었다. Tsai는 접합부의 rigid zone의 크기를 조절함으로써 판넬존의 진단변형을 고려할 수 있는 방법을 제안하였고[6], Stephan은 접합부에서 판넬존의 비틀림을 고려하도록 2개의 2차선형(bilinear) 회전 스프링을 사용하는 모델을 제안하였다[5]. Mulas는 판넬존의 변형을 고려하도록 변형 유형을 분류한 후, 분류된 모든 변형 유형들을 포함할 수 있는 해석 모델을 제안하였다[4].

본 논문에서는 판넬존에서의 변형을 하나의 트러스 부재의 축방향 변형으로 나타낼 수 있는 해석모델을 제안하였다. 제안된 방법은 효율적인 해석을 위해 판넬존에서의 변형을 트러스의 변형으로 치환함으로써 판넬존의 변형과 관련된 변수들의 영향을 쉽게 반영할 수 있는 이점이 있다.

2. 판넬존 해석 모델 제시

선형요소를 이용하여 철골 모멘트 골조의 보 및 기둥의 접합부를 모델링할 때, 그림 1과 같이 보와 기둥의 플랜지의 중심선 치수로 구조물을 모델링한다. 그림 2에서 보여지는 것과 같이 판넬존의 각 변을 4개의 강체 요소로 모델링한 후 그 가운데 부분에 대각 트러스 요소를 삽입함으로써 판넬존의 변형을 대각 트러스 부재의 축방향 변형으로 치환한다. 이 해석 모델은 트러스를 둘러싸고 있는 부재를 휨 변형과 축방향 변형이 전혀 발생하지 않는 강체 요소로 만들므로써 판넬존 부분의 모든 변형을 트러스 부재에서 고려할 수 있게 한다. 또, 강체 요소는 대각 트러스 부재의 자유도와 상이한 보 및 기둥의 자유도를 연결시켜주는 매개체 역할을 하기도 한다.

그림 2와 같은 해석 모델로 판넬존의 거동을 나타낼 경우에 다음과 같은 장점이 있다.

- 판넬존이 탄성 구간에 있을 경우에는 판넬존의 변형은 하중에 비례하게 되므로, 하중을 제외한 판넬존의 변형과 관련이 있는 모든 요소들의 영향을 반영하여 트러스 면적만 조절하여 간단히 판넬존의 거동을 나타낼 수 있다.

- 철골 모멘트 골조 구조물에서 지진시 구조물의 연성 거동을 유도하기 위하여 많이 사용되는 힌치를 가진 보나 원주형 절취보처럼 철골 기둥면에서 약간 떨어진 위치에 소성힌지가 발생하는 변단면을 가진 구조물에 대해서는 기둥면에서 소성 힌지 발생 위치까지의 보 부분을 강체 요소와 접합되는 보 부분으로 모델링한 후 소성힌지 발생위치에 회전 스프링을 추가함으로써 연성 거동을 유도하는 구조물도 간편하게 해석할 수 있다.

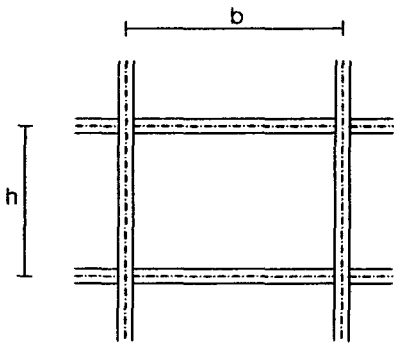


그림 1 선형요소로 표현되는 판넬존 치수

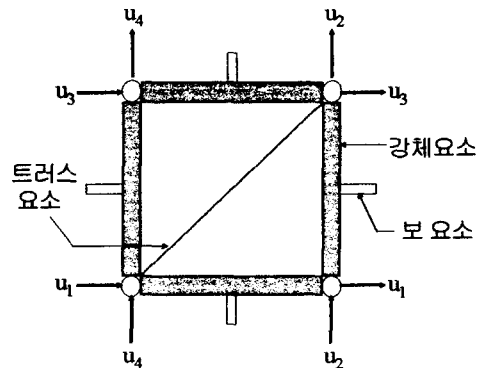


그림 2 제안된 접합부 모델

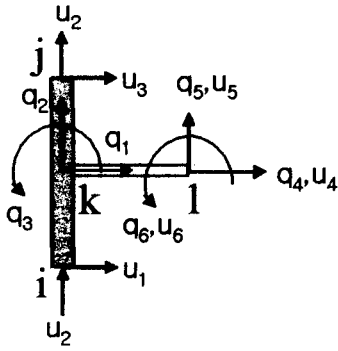


그림 3 보 요소와 강체 요소의 자유도

• 트러스 부재의 경우, 복잡한 소성 모델도 가능하므로, 판넬존의 소성 거동에 영향을 미치는 다양한 요소들의 영향을 소성 모델에서 반영할 수 있으므로 판넬존의 소성 거동도 비교적 간단히 나타낼 수 있다.

3. 강체 요소와 결합된 보 요소의 강성행렬 산정

강체 요소의 자유도와 강체 요소와 결합되는 보 요소의 자유도가 그림 3에 나타나 있다. 강체 요소와 결합된 보 요소의 강성행렬을 $u_1 \sim u_6$ 의 자유도로 나타내기 위해서는 그림 3에서 보여지는 바와 같이 보 요소의 자유도, $q_1 \sim q_6$ 를 식 (1)에 의해 강체 요소와 결합된 보의 자유도, $u_1 \sim u_6$ 로 치환하여야 한다.

$$q = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 & -\frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{pmatrix} = T_R \cdot u \quad (1)$$

식 (1)에서 행렬, q 는 보 요소의 자유도를 나타내고, 행렬, u 는 강체 요소와 결합된 보 요소의 자유도를 나타낸다. 또 행렬 T_R 은 보 요소의 자유도를 강체 요소의 자유도로 변환시켜주는 변환 행렬을 나타내고, L 은 강체 요소와 결합되는 보 요소의 길이를 나타낸다.

식 (2)와 같이 보 요소의 자유도로 표현된 힘과 변위 사이의 관계는 식 (1)의 치환 관계를 이용하여 식 (3)과 같이 강체 요소와 결합된 보 요소의 자유도로 힘과 변위 사이의 관계를 표현할 수 있다.

$$F_b = K_b \cdot q \quad (2)$$

식 (2)에서 F_b 및 K_b 는 보 요소의 자유도로 표현되는 하중 및 강성 행렬을 나타낸다.

$$F_R = K_R \cdot u = T_R^T \cdot K_b \cdot T_R \cdot u \quad (3)$$

식 (3)에서 F_R 및 K_R 은 강체 요소와 결합된 보 요소의 자유도로 표현되는 하중 및 강성 행렬을 나타낸다.

4. 트러스 요소의 면적 산정

판넬존에서의 변형은 크게 전단 변형과 휨 변형으로 나눌 수 있다. 기둥 상부에서 전달되는 전단력을 V 라 할 때, 판넬존에서의 전단 변형은 그림4와 같이 기둥 웨브 부분의 전단 응력에 의해 발생한다. 전단 응력, τ 가 전 단면적에 걸쳐 균등하게 분포될 경우, 전단응력, τ 는 식 (4)와 같이 전단력, V 를 기둥 웨브의 단면적으로 나눈 값으로 나타낸다.

$$\tau = \frac{V}{b \times t} \quad (4)$$

식 (4)에서 b 및 h 는 각각 기둥과 보 단면의 높이를 나타내고, t 는 기둥웨브의 두께를 나타낸다.

전단 응력, τ 로 인한 전단 변형, γ 가 발생할 경우, 판넬존의 횡방향 변위, Δ_s 는 식 (5)로 주어진다.

$$\Delta_s = \gamma \times h \quad (5)$$

판넬존의 전단변형으로 인한 횡방향 변위, Δ_s 는 전단 응력, τ 와 전단 변형, γ 사이의 관계를 이용하면 전단력, V 로 표현되는 식 (6)을 얻을 수 있다.

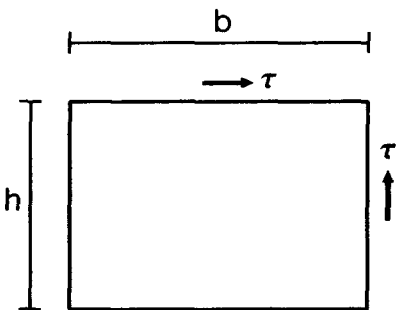


그림 4 판넬존의 전단응력도

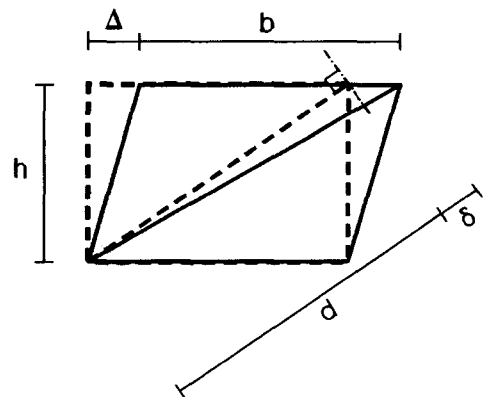


그림 5 횡방향 변위와 대각변위와의 관계

$$\Delta_s = \frac{V \times h}{G \times b \times t} \quad (6)$$

식 (6)에서 G는 전단 탄성계수를 나타낸다.

다음으로 판넬존의 휨 변형은 단부에 집중하중을 받는 캔틸레버 보와 같이 생각할 수 있으므로, 전단력, V가 판넬의 단부에 작용할 때 발생하는 횡방향 변위, Δ_f 는 식 (7)로 주어진다.

$$\Delta_f = \frac{V \times h^3}{3 \times E \times I} \quad (7)$$

식 (7)에서 E는 탄성계수를 나타내고, I는 기둥단면의 단면2차 모멘트를 나타낸다.

상부에서 전달되는 전단력 V에 의해 발생하는 접합부의 전체 횡방향 변위, Δ 는 전단변형으로 인한 횡방향 변위, Δ_s 와 휨 변형으로 인한 횡방향 변위, Δ_f 의 합이므로 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\Delta = \frac{V \times h}{G \times b \times t} + \frac{V \times h^3}{3 \times E \times I} \quad (8)$$

그림 5에 나타난 것과 같이 접합부의 횡방향 변위, Δ 로 인한 대각 부재의 길이 변화량, δ 는 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$(d + \delta)^2 - d^2 = (b + \Delta)^2 + h^2 - (b^2 + h^2) \quad (9)$$

식 (9)를 Taylor's series를 이용하여 간단하게 정리하면 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\delta = \Delta \times \frac{b}{d} \quad (10)$$

또한, 그림 4에서 보여지는 바와 같이, 전단력, V와 대각부재에 작용하는 축력, P 사이의 관계식은 식 (11)로 주어진다.

$$V = P \times \frac{b}{d} \quad (11)$$

식 (8)과 식 (11)을 식 (10)에 대입한 후, 축력, P를 받는 트러스 부재의 축방향 변형과 같은 형식으로 식을 정리하면 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$\delta = \frac{P \times d}{E} \times \left(\frac{E \times b \times h}{G \times d^3 \times t} + \frac{b^2 \times h^3}{3 \times I \times d^3} \right) \quad (12)$$

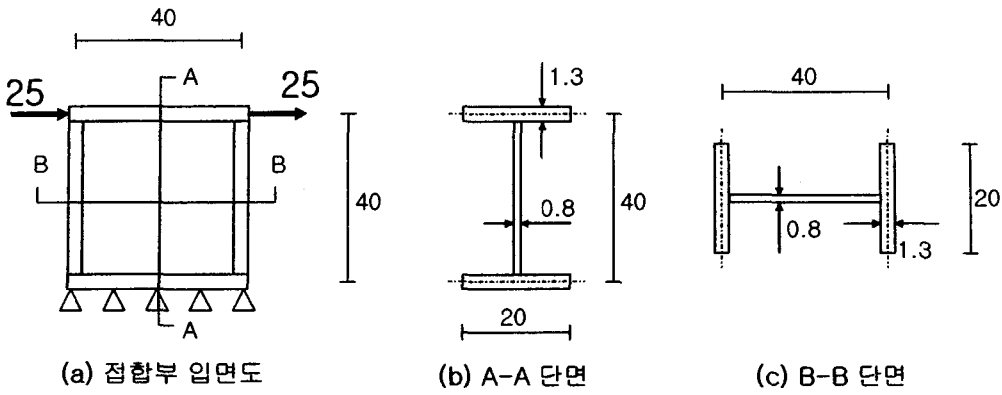


그림 6 판넬존 해석 구조물 및 부재의 단면

식 (12)로부터 대각 부재의 단면적을 분리해서 나타내면 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$A = \left(\frac{E \times b \times h}{G \times d^3 \times t} + \frac{b^2 \times h^3}{3 \times I \times d^3} \right)^{-1} \quad (13)$$

5. 해석 결과 분석

앞에서 제안된 해석 모델이 판넬존의 변형을 정확하게 나타내고 있는지를 확인하기 위하여 그림 6에서 보여지는 구조물에 대해 shell 요소를 사용하여 유한요소해석을 한 결과값과 제안된 방법으로 해석된 결과값을 비교한 것이 표 1에 나타나 있다. 유한 요소 해석시 사용된 shell 요소는 1.25 간격으로 메쉬를 나누었고, 가해지는 하중은 총 하중 50을 각각의 매쉬에 고르게 분포시켰다.

두 해석결과를 비교하면, 하중을 가하는 절점에서의 횡방향 변위값이 약 3.3%의 오차가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 식 (4)에서 주어진 접합부의 전단 응력 산정시 정확한 값을 사용하지 못하고 근사치인 평균값을 사용한 것 때문인 것으로 추측된다. 보다 보수적인 해석 결과를 얻고자 식 (4)로 주어진 전단 응력 대신 철골보에서 발생하는 최대 전단 응력을 사용하면 제안된 방법으로 해석된 횡방향 변위값이 유한요소 해석값보다 더 커지는 것을 알 수 있었다.

표 1 판넬존 해석 구조물의 변위 비교

해석 모델	횡방향 변위
Shell 요소 사용	0.10138
제안된 방법	0.09804

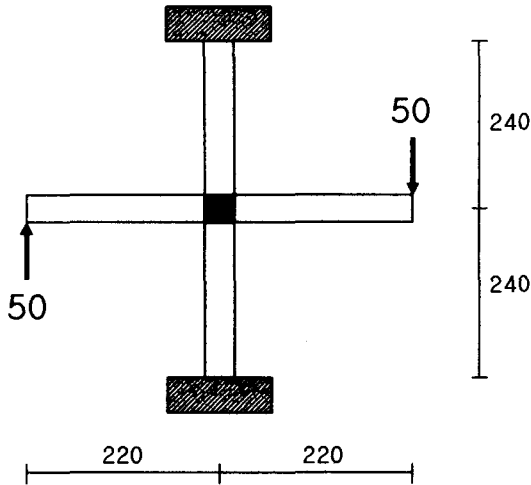


그림 7 전형적인 보-기둥 접합부 해석 구조물

또, 그림 7에 나타난 것과 같이 전형적인 보-기둥 접합부의 거동을 살펴볼 수 있는 모멘트 저항 골조 구조물에 대해 일반적으로 사용되는 보 부재만을 이용한 해석 결과와 본 논문에서 제안된 방법, 그리고 shell 요소를 사용하여 유한 요소 해석을 한 결과값들을 비교한 것이 표 2에 나타나 있다. 골조의 단면은 그림 6 (b)에 나타난 것과 동일한 단면을 사용하였다.

표 2의 결과를 살펴보면 판넬존의 변형을 전혀 고려하지 않은 경우에는 shell 요소를 사용한 해석 결과보다 약 13%정도 적은 변위를 나타내고, 판넬존의 영향을 무시한 해석 결과값은 40%나 큰 변위값을 나타내고 있다. 이에 반하여 본 논문에서 제안된 방법으로 해석된 구조물은 shell 요소를 사용한 해석 결과보다 약 2.4% 밖에 차이가 나지 않을 정도로 정확한 해석결과를 나타내고 있다.

그림 6에 있는 구조물 해석 결과와 그림 7에 있는 구조물의 해석 결과를 비교해 보면, 서로 상이한 경향을 볼 수 있다. 이것은 선형부재로 H형강 보의 정확한 변위를 해석할 수 없기 때문인 것으로 추측된다. 선형요소의 전단 변형은 유효전단면적을 조절하여 사용하게 되는데, 선형요소의 변위를 정확히 구하기 위해서는 이 유효전단면적을 정확히 알아야 한다. 그런데 H형강 단면에 대한 정확한 유효 전단면적을 알 수 없기 때문에 일반적으로 웹의 면적을 유효전단면적으로 사용하게 되고, 이것으로 인하여 보 또는 기둥 부재 자체에서의 변위 오차가 발생하게 되고, 이 오차로 인하여 두 구조물의 해석 결과의 경향이 약간 달라지게 된 것으로 생각된다.

표 2 전형적인 보-기둥 접합부 해석 구조물에 대한 변위비교

해석 모델	수직 방향 변위
Shell 요소 사용	9.132
frame with rigid zone	7.908
frame without rigid zone	13.601
제안된 방법	9.354

6. 결론

본 논문에서는 판넬존의 변형을 효율적으로 고려하기 위해 강재 요소 및 대각 트러스 요소를 이용함으로써 선형요소로 철골 모멘트 골조의 판넬존을 해석하는 모델을 제시하였다. 제안된 모델의 정확성은 다른 해석방법과 비교되었는데 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 철골 모멘트 골조의 접합부 변형을 본 논문에서 제안한 강재 요소 및 대각 트러스 부재를 이용하여 해석한 경우와 shell을 이용하여 3차원 해석을 한 결과와 비교할 때, 약 3.3%정도 적은 값을 나타내고 있다. 이것은 대각 부재의 단면 산정시 사용된 전단 용력의 부정확성에 기인한 것으로 추측된다. 전단 용력의 분포를 보다 정확히 나타낼 수 있는 전단 용력을 사용할 경우, 오차를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.
2. 본 논문에서는 단성 해석만 수행하였지만 대각 트러스 부재의 소성해석을 이용할 경우, 판넬존 부분의 소성 변형도 쉽게 고려할 수 있을 것으로 사료된다.
3. 본 논문에서 제안한 선형 부재를 이용한 판넬존 변형을 고려하는 모델링을 회전 스프링과 결합하여 이용하면 지진시 연성 거동을 유도하기 위한 철골 상세들인 헌치를 가진 보나 원주형 절취보를 가진 구조물을 보다 쉽게 해석할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 두뇌한국 21사업 핵심분야 사업비에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. 이철호, "독본 내진접합부를 갖는 철골 모멘트골조의 횡강성 평가", 한국전산구조공학회 논문집, 제 15권 제 4호, 2002, p639~647
2. Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", John Wiley & Sons, Inc., Third Edition.
3. Moon, S. K., Lee, D. G., "Efficient Models for Analysis of a Multistory Structure with Flexible Wings" Structural Engineering and Mechanics, Vol. 13, No. 5, 2002, pp465~478
4. Mulas, M. G., " A Structural Model for Panel Zones in Non Linear Seismic Analysis of Steel Moment-resisting Frames", Engineering Structures, Vol. 26, 2004, 363-380
5. Stephan, P. S., Ala, A., "Seismic Behavior of Steel Frames with Deformable Panel Zones", Vol. 124, No. 1, 35~42
6. Tsai, K. C., Popov, E. P., "Seismic Panel Zone Design Effect on Elastic Story Drift in Steel Frames", Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No. 12, 1990, p3285~3301