

Reduced Beam Section을 가진
철골모멘트 골조의 효율적인 비탄성 해석
An Efficient Inelastic Analysis of a Moment Frame Steel Structure
with Reduced Beam Section

조 소 훈* 박 찬 헌** 이 동 근***
Cho, So-Hoon Park, Chan-Hun Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

One of the methods improving the seismic behavior of a structure is the frame with reduced beam section (RBS) which cuts a segment of flanges of the beam near the beam-to-column connection so that the section with reduced flanges has smaller flexural strength than the beam end. It is difficult to analyze the RBS frame because RBS portion has circular-cut type flange. And inelastic response of the steel frame with the RBS is very sensitive to the RBS model. In this paper, the analytical models of RBS portion are investigated and the results of the inelastic analysis for RBS analytical models are compared and then the analytical model for RBS is determined based on the results of inelastic analysis. Inelastic behavior of the RBS frame and its dynamic characteristics are investigated for selected analytical model of RBS.

1. 서론

RBS(reduced-beam-section) 접합부는 지진이 발생했을 때 철골 모멘트 골조의 연성을 향상시키기 위한 상세들 중에서 뛰어난 연성을 보여준다. RBS는 기둥면으로부터 약간 떨어진 곳에 위치한 플랜지를 절단하여 보의 휨 강도를 국부적으로 저하시킴으로써 기둥면인 보 단부보다 기둥면으로부터 약간 떨어진 위치에 소성 힌지를 위치시킨다. 구조물의 내진성능을 향상시키는 방법으로서 RBS 골조에 대한 많은 연구들이 있었다. RBS 영역은 원주형상으로 플랜지를 절단해 내기 때문에 정확한 형상을 모델링하기 어렵고 해석결과가 해석 모델에 따라서 민감하게 변하므로 RBS 영역의 유효강성을 간단하면서 정확하게 나타내고 해석할 수 있는 여러 가지 방법들이 제안되었다. Shen 등은 RBS 영역을 등가 유효 보 부재로 모델링하는 경우와 강체 영역에 회전 스프링으로 모델링하는 경우에 대하여 비선형 해석결과가 상이하게 되는 것을 보여주었다.[3] 또 이 철호는 공액보법에 의한 보의 휨 변형으로부터 RBS 영역의 등가 유효폭 개념을 제안하였다.[1]

* 성균관대학교 건축공학과 연구전임강사, 공학박사, keystone@hanmail.net

** 성균관대학교 건축공학과 석사과정

*** 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 연구에서는 RBS 영역을 간단하게 모델링하는 몇 가지 방법을 고찰한 후 RBS 영역의 비탄성 거동까지 효율적으로 해석할 수 있는 해석 모델을 선정된 후에 선정된 해석모델을 사용하여 RBS를 가진 단일지간 골조를 대상으로 하여서 판넬존의 변형을 고려한 해석모델과 보-기둥 접합부를 강체영역으로 해석한 모델에 대한 해석결과를 고찰함으로써 해석모델의 차이에 따른 RBS의 비탄성 응답의 차이를 알아보았다.

2. RBS 해석 모델 비교

RBS 영역을 간단히 해석하는 방법들 중에서 그림 1에 나타난 것과 같은 3가지 해석모델을 선정하였다. 각 모델에서 RBS 영역의 강성은 이 철호가 제안한 공액보법에 근거한 RBS의 휨 변형과 RBS 영역을 치환한 부분의 휨 변형이 동일해지도록 강성을 산정하였다.[1] 이 방법에 의하면 각 모델의 강성은 식 (1)-(3)으로 주어진다.

$$I_{eq} = \frac{\int_a^{a+b} M - Vx dx}{\int_a^{a+b} \frac{M - Vx}{I_{rbs}} dx} \quad (1)$$

$$K_{s,2} = \frac{M - V(a+b/2)}{\int_a^{a+b} \frac{M - Vx}{EI_{rbs}} dx} \quad (2)$$

$$K_{s,3} = \frac{M - V(a+b/2)}{\int_a^{a+b} \frac{M - Vx}{EI_{rbs}} dx - \int_a^{a+b} \frac{M - Vx}{EI_b} dx} \quad (3)$$

위 식에서 M 및 V 는 보 단면에서의 휨 모멘트 및 전단력을 나타내고 I_{rbs} 및 I_b 는 각각 RBS 및 보의 단면2차 모멘트를 나타낸다. 그리고 I_{eq} 는 해석모델 A에서 RBS 영역을 치환한 등가보의 단면2차 모멘트를 나타내고, $K_{s,2}$ 와 $K_{s,3}$ 은 각각 해석모델 B와 해석모델 C에서의 스프링 강성을 나타낸다.

RBS 유한요소해석과 해석모델 A에서는 강제의 비선형 해석모델을 이차선형곡선으로 가정하였고, 해석모델 B와 해석모델 C는 RBS의 최소단면의 항복강도와 동일한 항복강도를 가지는 이차선형곡선으로 가정하였다.

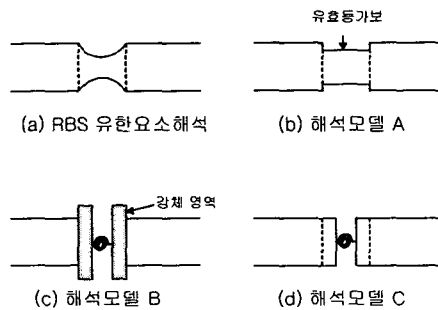


그림 1 RBS 해석모델의 종류

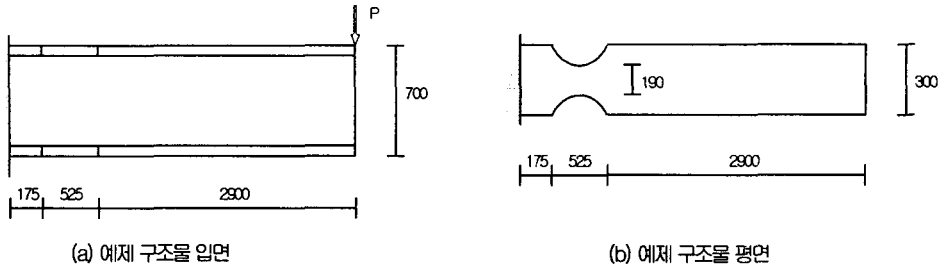


그림 2 RBS 해석 예제 구조물

비탄성 거동에 대한 해석모델의 차이를 비교하기 위하여 그림 2의 구조물에 대하여 그림 1의 해석모델들을 이용하여 비탄성 정적해석을 수행하였다. 해석시 사용된 철골 부재는 H-700*300*13*24를 사용하였으며 철의 항복 강도는 $2.4\text{tf}/\text{cm}^2$ 을 사용하였다. 그리고 부재가 항복한 후의 강성은 탄성강성의 2%의 소성강성을 가지는 것으로 가정하였고 하중변화에 따른 해석 결과는 그림 3에 나타나 있다.

그림 3의 결과를 살펴보면 해석모델 A에서는 등가 유효 단면이 RBS의 최소 단면보다 크기 때문에 항복이 가장 늦게 발생하지만 RBS의 실제 거동과 유사하게 항복영역이 증가하는 특성을 가지고 있으므로 유한요소해석결과와 가장 근접한 것을 볼 수 있다. 또 해석모델 B는 RBS 영역이 모두 스프링 강성으로 나타나는데 공액보법에 의하여 RBS 영역에서 동일한 처짐각이 발생하도록 산정한 스프링에 처짐각이 집중되어 플랜지 절단면이 끝나는 부분에서의 회전각이 실제보다 커지게 되고 이것이 단부의 변위에 영향을 주어 탄성 상태에서도 실제 구조물의 거동과 다소 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 또 이 모델의 경우에는 RBS 영역이 모두 항복하는 효과가 나타나기 때문에 RBS의 전체 영역이 항복했을 경우로 해석하고 있다. 해석 모델 C는 절단된 플랜지로 인하여 감소된 강성이 스프링 강성으로 나타나고 나머지 부분은 일반 보로 나타나는데 RBS가 항복을 시작하는 부분에서는 가장 정확히 해석하고 있지만 RBS 영역에서 항복이 진행되는 부분을

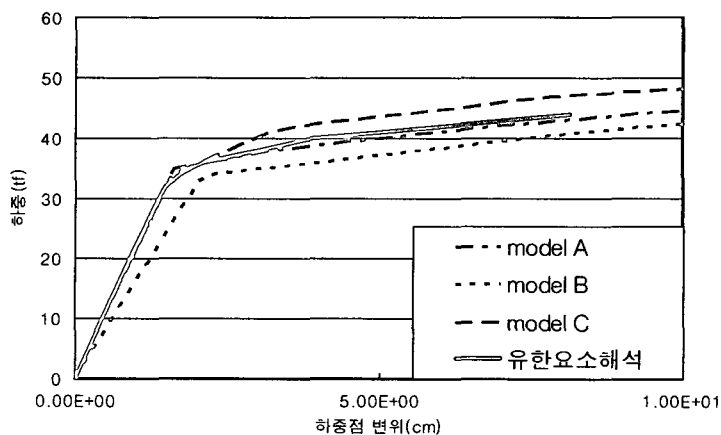


그림 3 RBS 해석모델에 따른 비탄성 해석결과

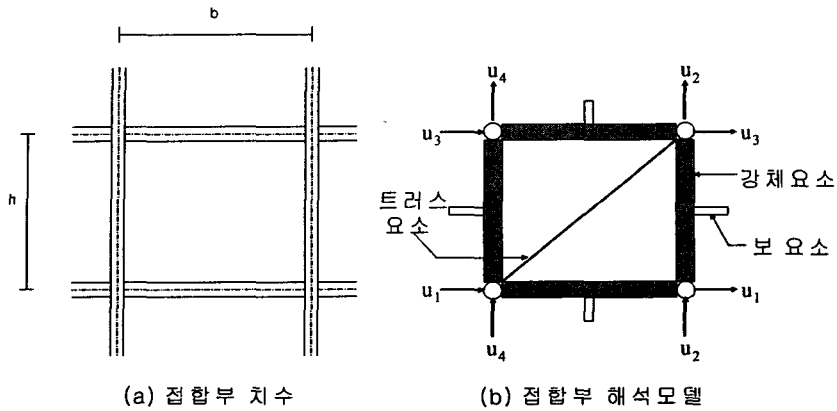


그림 4 판넨존 변형을 고려하는 해석 모델

제대로 반영하지 못하여 이 부분에서는 실제 구조물보다 더 적은 변위를 나타내고 있다. 하지만 항복이 더 진행되어 플랜지가 절단되지 않은 부분에서도 항복하게 되는 부분에서는 다시 해석모델 A의 해석결과와 동일한 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다.

위에서 살펴보면 RBS의 비탄성 거동을 가장 근접하게 나타내는 것은 모델 A이지만 RBS 구간의 거동을 간단하게 나타낼 수 있는 해석모델은 스프링이므로 본 논문에서는 스프링을 이용한 모델 중에서 실제 구조물과 더 근접한 거동을 하는 모델 C를 이용하여 RBS 영역을 해석하기로 한다.

3. 해석 모델 선정

3.1 판넨존 해석 모델

본 연구에서 보와 기둥의 판넨존 변형을 고려하기 위하여 사용한 해석 모델은 그림 4에서 볼 수 있듯이 기둥과 보의 플랜지 부분에 강체요소를 두고 가운데 트러스 부재를 설치함으로써 판넨존의 변형을 트러스 부재의 변형으로 치환하는 해석모델을 사용하였다. 이 해석 모델에서 사용된 트러스 부재의 단면적은 다음과 같다.[3]

$$A = \left(\frac{E \times b \times h}{G \times d^3 \times t} + \frac{b^2 \times h^3}{3 \times I \times d^3} \right)^{-1} \quad (4)$$

위 식에서 E와 G는 각각 탄성계수와 전단 탄성계수를 나타내고, I는 기둥단면의 단면2차 모멘트를 나타낸다. 그리고 d는 대각 부재의 길이로서 $\sqrt{b^2 + h^2}$ 을 나타낸다.

3.2 해석 구조물 선정

RBS에서 플랜지의 절삭폭이 적을 경우 RBS 영역에서 항복하기 전에 보 단부에서 먼저 항복하여 집합부

에 과도한 연성을 필요로 할 수 있고, 절삭폭을 너무 크게 하면 RBS 영역에서 횡방향 좌굴이 발생할 위험이 있다. RBS 영역의 치수는 SAC 2000에서는 최소 40%의 보 플랜지 절삭을 권장하고 있고 보 플랜지 폭의 40~60%를 절삭하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 특정한 부재에 대하여 RBS의 소성힌지가 변형 경화 상태에 도달했을 때 보-기둥 접합부에 유입되는 휨 모멘트의 크기가 보의 전단면의 소성 휨 강도를 초과하지 않도록 구한 그림 2와 같은 플랜지의 절삭폭을 사용하였다.[1]

보와 기둥의 접합부를 강체구간으로 모델링한 해석모델과 판넬존 변형을 고려한 해석모델에서의 RBS의 회전각의 차이 및 구조물의 응답의 차이를 고찰하기 위하여 그림 5에 나타난 구조물에 대하여 기둥의 간격을 6m, 9m, 12m로 변화시키면서 동일한 하중을 구조물에 가하였을 때 구조물의 탄성 및 비탄성 해석을 수행하였다.

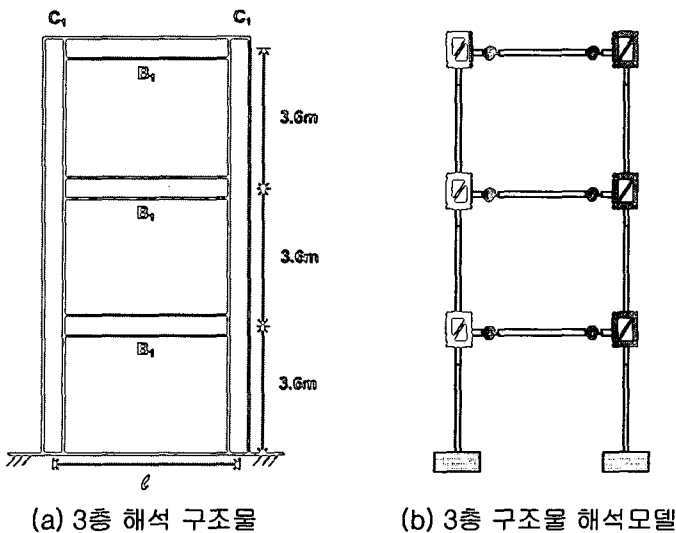


그림 5 해석모델에 따른 RBS 골조의 거동을 알아보기 위한 구조물

4. 해석 결과 분석

RBS 골조에서 해석모델에 따른 구조물의 거동의 차이를 살펴보기 위하여 탄성 영역에서 구조물이 거동하는 경우에 대하여 구한 구조물의 층간 변위 및 RBS 영역의 회전력이 그림 6과 그림 7에 나타나 있다. 탄성 상태에서 지간이 커질수록 패널존의 변형을 고려했을 때 층간 변위와 패널존 변형을 고려하지 않았을 때 구한 층간 변위의 차이가 커지는 것을 볼 수 있다. RBS 영역의 회전량도 이와 비슷한 경향을 보여주고 있는데 지간이 커질수록 전도 모멘트가 기둥의 축력으로 전달되는 비율이 감소하고 기둥의 캔틸레버 거동이 더 커지기 때문에 지간이 커질수록 판넬존의 변형의 영향이 더 커지게 되는 것으로 추측된다.

또 그림 8을 살펴보면 탄성해석의 경향과는 반대로 RBS가 비탄성 영역에서 거동할 경우 판넬존의 변형을 고려한 해석모델과 판넬존 변형을 고려하지 않은 해석모델에서 구한 RBS 영역의 회전각의 차이가 구조물

의 지간이 짧을수록 더 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 구조물의 지간이 큰 경우보다 지간이 짧은 경우에 RBS의 항복으로 인하여 기둥의 캔틸레버 거동의 비율의 차이가 더 커질 수 있기 때문에 해석모델에 따른 RBS의 회전각의 차이도 더 커지게 나타나는 것으로 생각된다. 즉 비탄성 영역에서 해석모델에 따라 구조물의 응답의 차이가 더 커지는 것은 판넬존 변형에 따른 구조물의 탄성상태의 응답의 차이보다는 RBS 영역의 항복으로 인하여 재분배되는 하중이 두 해석모델의 응답의 차이를 크게 하는 것으로 추측할 수 있다.

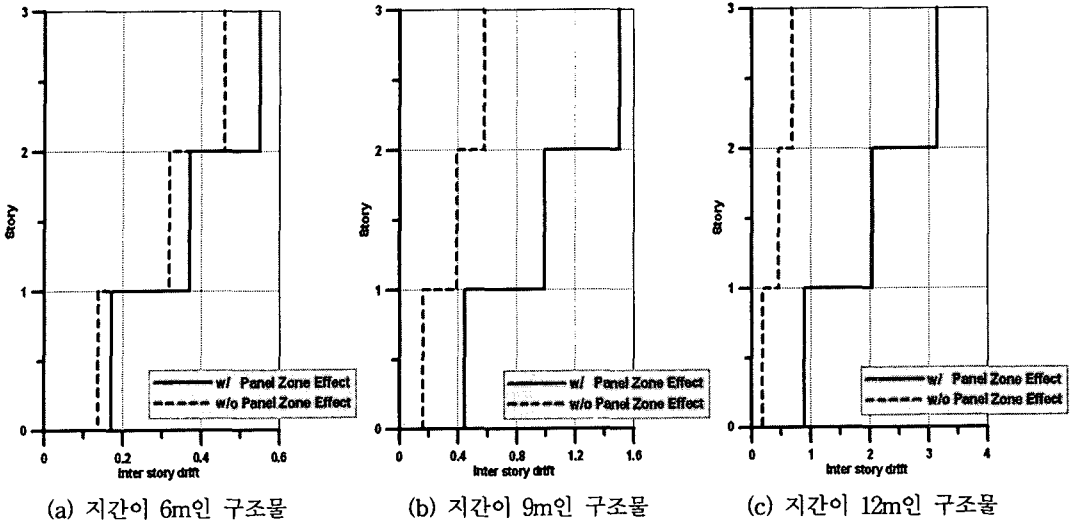


그림 6 구조물의 층간변위 비교 - 탄성 상태

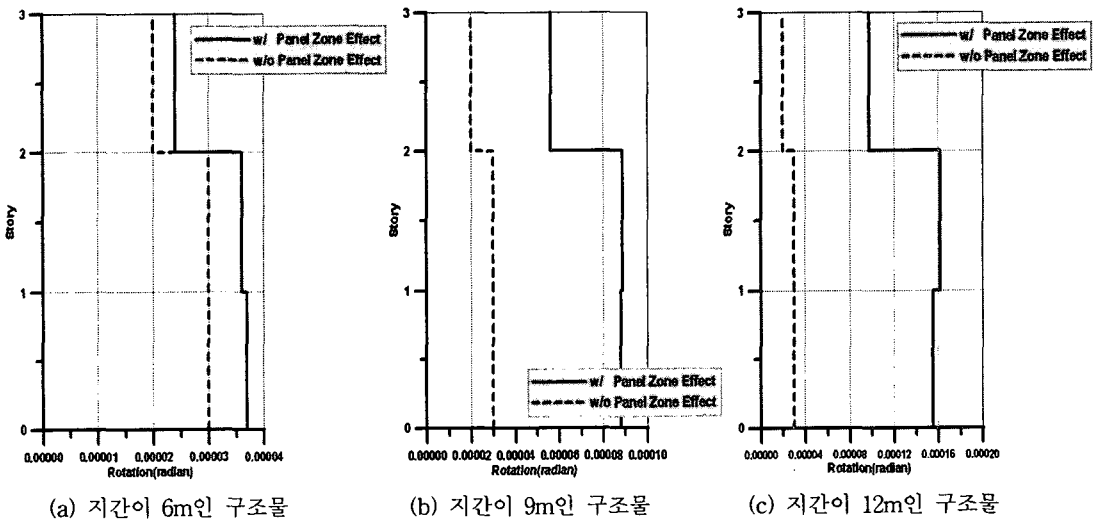
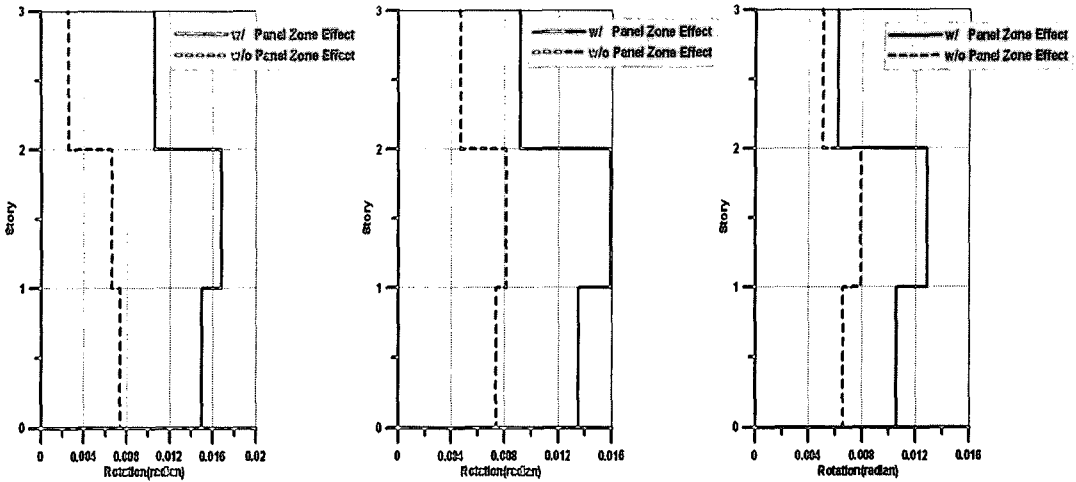


그림 7 RBS 영역의 회전량 비교 - 탄성 상태



(a) 지간이 6m인 구조물

(b) 지간이 9m인 구조물

(c) 지간이 12m인 구조물

그림 8 RBS 영역의 회전량 비교 - 비탄성 상태

5. 결론

해석모델의 차이에 따른 RBS 골조의 비탄성 거동을 알아내기 위한 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) RBS 영역의 거동은 해석모델에 따라서 탄성 영역에서는 동일한 거동을 나타내어도 비탄성영역의 거동이 달라지는 것을 볼 수 있다.
- (2) RBS 골조가 비탄성 거동을 할 경우 판넬존의 변형을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우의 응답차이가 더 커지는 것을 볼 수 있다.
- (3) 해석모델에 따른 RBS 영역의 탄성변형의 차이는 구조물의 지간이 클수록 더 커지게 되고 소성변형은 구조물의 지간이 짧을수록 더 커지게 된다.

감사의 글

본 연구(03R&D C04-01)는 건설교통부와 한국건설교통 기술 평가원(KICTTEP)에서 재정적으로 지원을 받았음을 밝히며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- 1. 이철호, "독본 내진접합부를 갖는 철골 모멘트골조의 휨강성 평가", 한국전산구조공학회 논문집, 제 15권 제 4호, 2002, p639~647

2. 이철호, 전상우, 김진호, "RBS 철골모멘트접합부의 내진거동평가를 위한 반복재하 실험대 실험", 한국지진공학회 논문집, 2002.
3. 조소훈, 박찬현, 이동근, "선형요소를 사용하여 판넨존 변형을 고려한 해석 모델", 한국전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집 제 17권 제 1집, 2004, p293~300
4. T. Kitjasteanphun, J. Shen, W. Srivanich and H. Hao, "Inelastic Analysis of Steel Frames with Reduced Beam Sections", Struct. Design Tall Build. 10, 2001. 231~244
5. J. Shen, T. Kitjasteanphun, W. Srivanich, "Seismic Performance of Steel Moment Frames with Reduced Beam Sections" Engineering Structures, Vol. 22, 2000, 968~963
6. Helmut Krawinkler, Akshay Gupta, "Story Drift Demands for Steel Moment Frame Structures in Different Seismic Regions", 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering.
7. Stephen P. Schneider, Associate Member, ASCE, and Ala Amidi, "Seismic Behavior of Steel Frames with Deformable Panel Zones", Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No. 1, 1998, 35~42