

역V형 가새 골조의 개선된 디자인 모델을 위한 해석적 연구

Analytical Investigation for Improved Design Models of Chevron Braced Frames

유정한¹⁾

Yoo, Jung-Han

국문 요약 >> 가새 골조는 내진 시스템으로 자주 사용되고 역V형 가새 골조 역시 종종 사용된다. 최근 연구는 가새 골조의 지진 성능은 지진 변형 요구의 직접적 고려를 통한 가새 골조 거시 플레이트 연결부의 설계와 선택된 성능 레벨에 거시 플레이트의 항복을 허용함으로써 개선될 수 있다고 지적한다. 역V형 가새 골조의 지진 성능에 대한 거시 플레이트와 골조 부재의 영향을 조사하고 개선된 디자인 모델을 개발하기 위해 유한요소 모델을 이용한 매개변수 연구를 수행했다. 골조 크기, 간극 거리, 거시 플레이트 두께와 테이퍼 플레이트를 포함한 골조 디테일의 영향에 대해 조사했다. 그 결과 연결부의 적절한 디테일은 골조 성능의 개선에 크게 기여할 수 있다는 결론을 얻었다. 특히 거시 플레이트 두께는 골조 성능에 커다란 영향을 미친다는 결론을 얻었다.

주요어 역V형 가새골조, 거시 플레이트, 유한요소해석, 비탄성 반응

ABSTRACT >> Steel Braced frames are a commonly-used seismic resisting system, and chevron steel braced frames are a frequently used type of steel braced frame. Recent research has indicated that the seismic performance of braced frames can be improved by designing the braced frame gusset plate connections in a manner that directly reflects seismic deformation demands, and by permitting yielding in the gusset plate at select performance levels. A parametric study using Finite Element (FE) models was conducted to examine the influence of the gusset plate and framing elements on the seismic performance of chevron braced frames, and to calibrate and develop improved design models. The impact of the frame details, including frame sizes, clearance requirements, gusset plate thickness and tapered plate, was explored. The results suggested that proper detailing of the connection can result in a significant improvement in the frame performance. The results also show that the gusset plate thickness has a significant impact on frame performance.

Key words chevron braced frame, gusset plate, finite element analysis, inelastic response

1. 서론

지진 다발지역에서 항력을 지지하기 위해 널리 사용되는 가새 골조 시스템은 경제적인 구조 시스템으로서 높은 강성과 저항력이 특징이다. 빈도가 낮은 강진에 대해 가새골조 시스템은 비탄성적으로 변형하고 가새의 인장항복과 좌굴 후 변형을 통해 에너지를 소산시킨다.⁽¹⁾ 그러나 가새 시스템의 반응은 가새, 연결부, 골조 부재 모두에 달려있다.

최근의 연구는 개선된 연결부 디테일로 모델한 사각형 HSS 튜브 가새의 성능에 대해 조사했다.⁽²⁾ 이 연구에서 거시 플레이트가 적절히 디자인되면 HSS 튜브를 포함한 골조 성능을 높인다는 결과를 얻었다. 이 연구는 코너 거시 플레이트를 포함한 가새에 관한 것으로 연결부는 가새의 최대성능을 발현하기 위해 충분한 강도와 강성을 가지고 디자인해야 하지만 지나치게 부과된 연결부 강성과 저항력은 가새의 비탄성 변형 능력과 연성 능력에 부정적인 영향을 미친다는 사실을 보여준다. 또한 이 연구에서는 가새골조는 거시 플레이트에 인접한 보와 기둥의 현저한 항복을 나타낸다는 사실도 보여준다. 타원형 간극거리 모델을 제안, 얇고 더욱 컴팩트한 거시 플레이트를 유도하여 가새의 연성과 변형 능력을 증가시켰다.

과거 연구는 코너 거시 플레이트에 초점을 맞추었고 종종 보

¹⁾ 정희원·대한주택공사 도시재생사업단 선임연구원, 공학박사
(교신저자: happyjh@gmail.com)

본 논문에 대한 토의를 2009년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 8. 13 / 수정일 : 2009. 10. 6 / 게재확정일 : 2009. 10. 9)

의 중앙에 V형이나 X형의 가새 골조를 사용한 예를 볼 수 있었지만 V형이나 역V형 가새골조에 관한 연구는 많지 않았다. (3),(4) 역V형 가새골조는 보의 항복에 의한 골조의 횡강성이 급격히 감소하지 않도록 불균형력을 고려하여 설계해야 한다. 본 연구에서는 유한요소법 (FEM)을 이용 불균형력을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 가새골조를 모델링하고 매개변수 연구를 통해 가새의 연결부의 변화의 시스템 내진성능에 대한 영향을 조사하였다. 이를 통해 역V형 가새골조의 내진성능과 연결부 설계의 시스템 성능에 대한 영향을 파악하고 발전된 연결부 설계를 위한 방안을 모색하고자 한다.

비탄성 해석 모델은 항복, 좌굴, 비탄성 변형 등을 예견할 수 있으나, 철골의 초기 크래킹이나 연성 파괴를 예견 할 수 없다. 이전의 해석적 연구는 비탄성 해석 모델을 통해 얻어진 등가소성변형률은 (ϵ_{eqv}) 초기 크랙이나 파단의 비교적 좋은 척도라는 것을 보여준다. 그리고 이때의 ϵ_{eqv} 한계치는 실험에서 얻어진 초기 크랙과 파단으로부터 얻어진 것이다. (5),(6) ϵ_{eqv} 는 다음 식 (1)과 같이 von Mises의 공식을 이용한 소성변형요소들로부터 계산되었다.

$$\epsilon_{eqv} = \frac{1}{\sqrt{2}(1+\nu')} [(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + \frac{2}{3}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 등은 요소의 변형률이고 ν' 는 포이송 비이다. 이 ϵ_{eqv} 개념은 유한요소 타입과 메시 크기가 동일하게 유지되는 한 다른 형태나 다른 구조적 상황에도 적용될 것이다. 그러므로 이전 논문에서 (6) 개발되었던 ϵ_{eqv} 한계치는 동일한 메시 크기와 같은 요소 모델을 이용하는 한 여기서도 유효하다.

각 하중 사이클의 끝에서 얻어진 등가응력도는 (σ_{eqv}) 국부 거동을 조사하기 위해 거싯 플레이트, 가새 순단면, 가새의 중심 등의 주 구조 요소에 대해 계산되었다. 이 σ_{eqv} 은 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\sigma_{eqv} = \left(\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

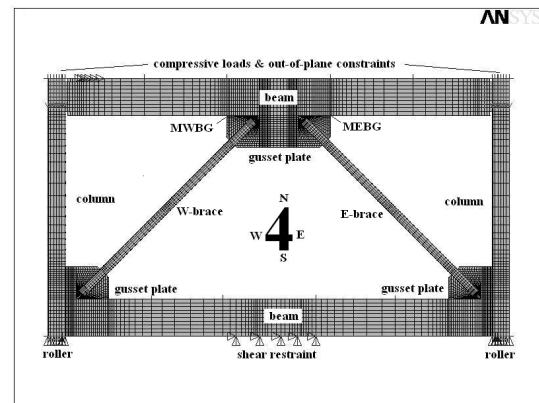
여기서, $\sigma_x, \sigma_y,$ 등은 요소의 응력이다. σ_{eqv} 의 결과는 응력 곡선도를 이용하여 나타내었다. 곡선도의 색은 그림 4와 6에서 보듯이 σ_{eqv} 이 커짐에 따라 더욱 어두워진다. σ_{eqv} 은

0에서 483 MPa까지 분포되어 있다. 거싯 플레이트의 항복은 σ_{eqv} 이 약 450 MPa에서, 골조의 항복은 σ_{eqv} 이 약 400 MPa에서, 가새의 항복은 σ_{eqv} 이 약 500 MPa에서 일어나는 것으로 예측된다.

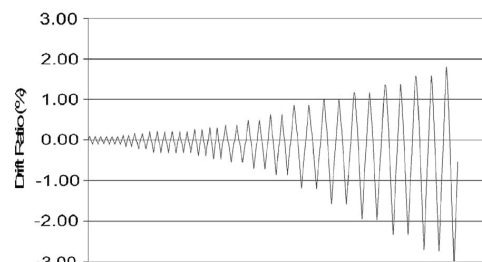
2. 해석적 연구 프로그램

역V형 가새골조와 거싯 플레이트의 반응을 시뮬레이션하기 위해 유한요소모델 (7) 이용한 일련의 탄성 및 비탄성 해석이 수행되었다. 비탄성 해석의 정확성과 신뢰성을 확보하기 위해 해석적으로 예측된 거동과 실험적으로 관찰된 거동 간의 상세한 비교가 이루어졌고 좀 더 상세한 모델의 기술과 실험 결과와의 비교는 이전 논문에서 볼 수 있다. (6) 유한요소모델은 3-노드 삼각형과 4-노드 사각형 쉘 요소로 구성되었고 요소의 각 노드는 6-자유도를 포함하고 있다 (Shell181). 이 요소는 두께가 얇은 쉘 구조에서 중간 두께의 쉘 구조까지 사용된다. (7) 대변형 요소 공식은 좌굴을 시뮬레이션하기 위해, 이선형의 이동경화형 모델은 반복 비탄성 거동을 시뮬레이션하기 위해 사용됐다. 해석에서 사용된 물성치는 실험에서 얻어진 측정값을 기초로 하였다. (2)

그림 1은 전형적인 유한요소모델을 보여준다. 하위 보의 아래 플랜지의 병진 자유도는 실험의 볼트 지지 부분으로써 골조의 면내 병진 변위를 제어하기 위해 구속됐다. 각 기둥 하부는



(a) 유한요소모델



(b) 하중 이력

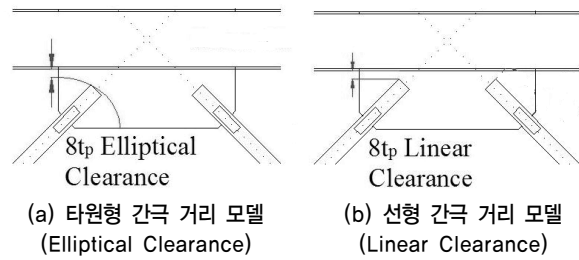
〈그림 1〉 유한요소모델과 하중 이력

실험체에서 이 부분의 병진 구속이 없으므로 이동지점으로 모델링하였다. 각 기둥 상부는 면외 방향의 변위를 제어하기 위해 구속하였다. 유한요소모델의 추가 면외 방향 구속은 실험에서의 골조의 횡 지지부에 적용하였다.

볼트로 접합된 보-기둥 전단 연결부를 모델링하기 위해 비선형 스프링 요소를 (COMBIN39) 사용했고 여기에 이용된 값은 Liu 의 실험에서 얻어진 비선형 힘-변위 곡선을 기초로 하여 구했다.⁽⁸⁾ 유한요소 솔루션의 수렴과 정확도를 확보하고 가능한 짧은 실행 시간을 얻기 위해 메시 세분화에 대한 연구가 연구 초기에 수행됐고, 보-기둥, 거싯 플레이트 연결부에 비교적 조밀한 메시가 (약 25mm × 25mm) 사용됐다. 그 외의 항복이 일어나지 않은 곳이나 제한된 탄성 변위가 일어난 부분은 비교적 크기가 큰 메시로 모델링하였다. 모델에 대한 더 자세한 내용과 모델링 과정은 이전 논문에서 볼 수 있다.^{(5),(6)}

기준 모델 MF_GPT9.5는 불균형력을 고려한 모델로 W27x129 보, W12x96 기둥, 45° 대각 HSS 5x5x3/8 가새, 그리고 중앙과 코너의 거싯 플레이트 (두께 9.5mm)로 구성 되어 있다. 반면 모델 SF_GPT9.5는 저층 빌딩의 1층이나 중층 빌딩의 상층의 단일 가새 (1층 1경간 중심가새골조)를 시뮬레이션한 모델로 여기서의 거싯 플레이트 두께는 Uniform Force Method⁽¹⁾에 의해 디자인했다. 참고로 거싯 플레이트 들은 타원형 간극 거리 (Elliptical Clearance)를 이용 디자인했다 (그림 2). 알파벳 글자는 각 해석의 변수의 구분을 명확히 하기 위해 의미를 부여하였다. (표 1)

- MF_GPT9.5, SF_GPT9.5, LF_GPT9.5는 중간크기 골조 (Medium Frame), 작은 골조(Small Frame), 큰 골조(Large Frame)에 9.5mm 두께의 거싯 플레이트 (Gusset Plate Thickness)를 가진 모델
- MF_GPT9.5_MLC는 MF_GPT9.5에 중앙 (Middle)거싯 플레이트를 선형 간극 거리(Linear Clearance)를 이용하여 콤팩트하게 디자인한 모델 (그림 2)
- MF_GPT22.2는 중간크기 골조(Medium Frame)에 22.2mm 두께의 거싯 플레이트 (Gusset Plate Thickness)를 가진 모델
- MF_GPT22.2CT는 MF_GPT22.2에 코너 (Corner)거싯 플레이트를 15° 테이퍼(Tapered)한 모델 (그림 6f)
- MF_GPT9.5C22.2M은 중간크기 골조에 9.5mm 두께의 코너 (Corner) 거싯 플레이트와 22.2mm 두께의 중앙 (Middle) 거싯 플레이트를 가진 모델을 의미한다.



〈그림 2〉 간극 거리

〈표 1〉 해석모델의 제원

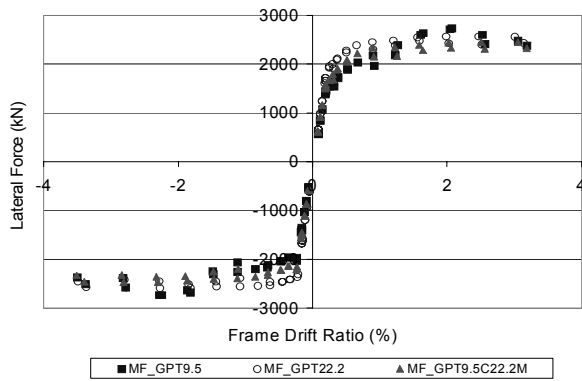
분류	변수	보(mm) 기둥(mm)	플레이트 두께 (mm)
골조크기	MF_GPT9.5	W27×129 W12×96	9.5
	SF_GPT9.5	W16×45 W12×72	9.5
	LF_GPT9.5	W33×169 W12×120	9.5
간극거리	MF_GPT9.5_MLC	W27×129 W12×96	9.5 (Linear Clearance for Middle Plate)
플레이트 두께와 테이퍼	MF_GPT22.2	W27×129 W12×96	22.2
	MF_GPT22.2CT	W27×129 W12×96	22.2 (Tapered Corner Plate)
	MF_GPT9.5C22.2M	W27×129 W12×96	9.5(Corner Plate) 22.2(Middle Plate)

3. 해석결과

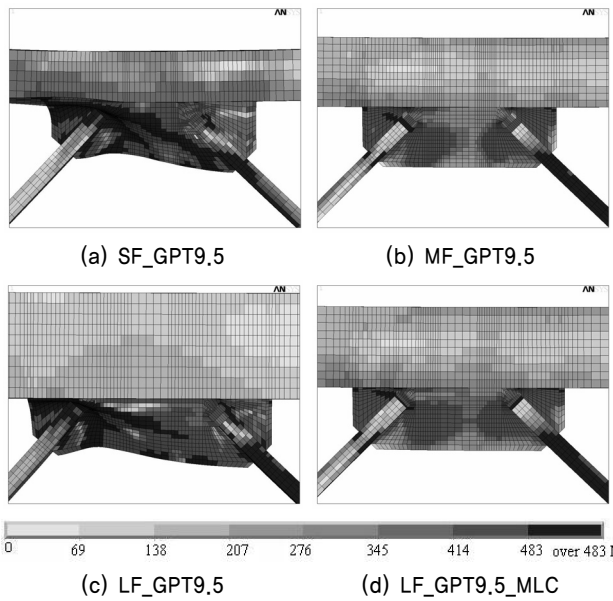
유한요소모델에서 얻어진 힘-변위 관계는 그림 3과 같다. 거싯 플레이트의 두께가 다른 경우만을 비교했으며, 그 결과 거싯 플레이트의 두께는 힘-변위 곡선에는 비교적 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

3.1 골조 크기의 영향

골조 크기에 대한 연구 결과, 불균형력을 무시하고 디자인 하여 작은 보를 가진 모델 (SF_GPT9.5)의 경우, 그림 4 (a)에서 보듯, 불균형력에 의해 중앙 거싯 플레이트는 물론 보에 응력의 상당한 증가를 초래했다. 그리고 불균형력을 너무 크게 고려해 디자인하여 큰 보를 가진 모델 (LF_GPT9.5)은 보에 응력 집중은 사라졌지만 여전히 중앙 거싯플레이트에 응력집중 현상을 볼 수 있었다 (그림 4 (c)). 반면, 불균형력을 고려해 설계한 모델의 경우, 그림 4 (b)에서 보듯, 보에 응력 집중 현상이 나타나지 않았고 거싯 플레이트에 응력과 변형을 줄이는데 효과적이었다.



〈그림 3〉 힘-변위 곡선



〈그림 4〉 골조크기와 간극 거리 (2.7% 변위비)

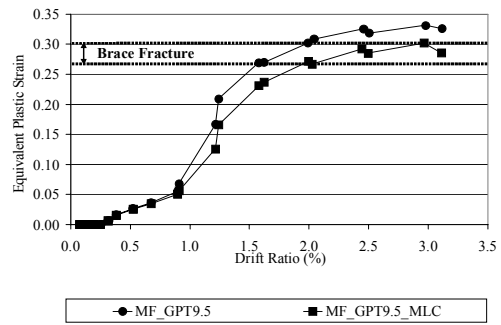
3.2 간극거리의 영향

중앙 거싯 플레이트를 선형 간극 거리를 이용하여 모델한 경우 그림 2b에서 보듯이 거싯 플레이트는 좀 더 작아졌고 가새는 골조에 더욱 근접해졌다. 하지만 보와 거싯 플레이트에 나타난 응력과 변형은 타원형 간극 거리를 이용한 모델 (그림 4b와 4d)의 결과와 큰 차이가 없었다.

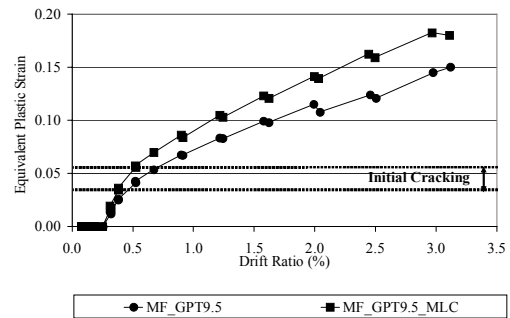
앞에서 언급한 ϵ_{eqv} 의 한계치는 실험 결과에서 얻어진 결과치에 의해 결정됐다.⁽⁵⁾

- 좌굴한 가새의 중심부 파단은 좌굴한 가새의 국부 변형부에서의 최대 ϵ_{eqv} 가 0.271에서 0.306 사이 일 때
- 보와 거싯 플레이트 연결부의 초기 크랙은 최대 ϵ_{eqv} 가 0.033에서 0.055 사이 일 때 발생했다.

변위비의 함수로서의 최대 ϵ_{eqv} 는 위의 ϵ_{eqv} 의 한계치를 이용, 다양한 디자인 매개변수에 대한 크랙 발생의 상대적 잠재성을 그림 5와 7에서 표현했다. 앞에서 언급했듯이,



(a) W-brace (서쪽 가새)



(b) MWBG (보와 중앙 거싯플레이트 서쪽 연결부)

〈그림 5〉 등가소성변형률 (ϵ_{eqv})

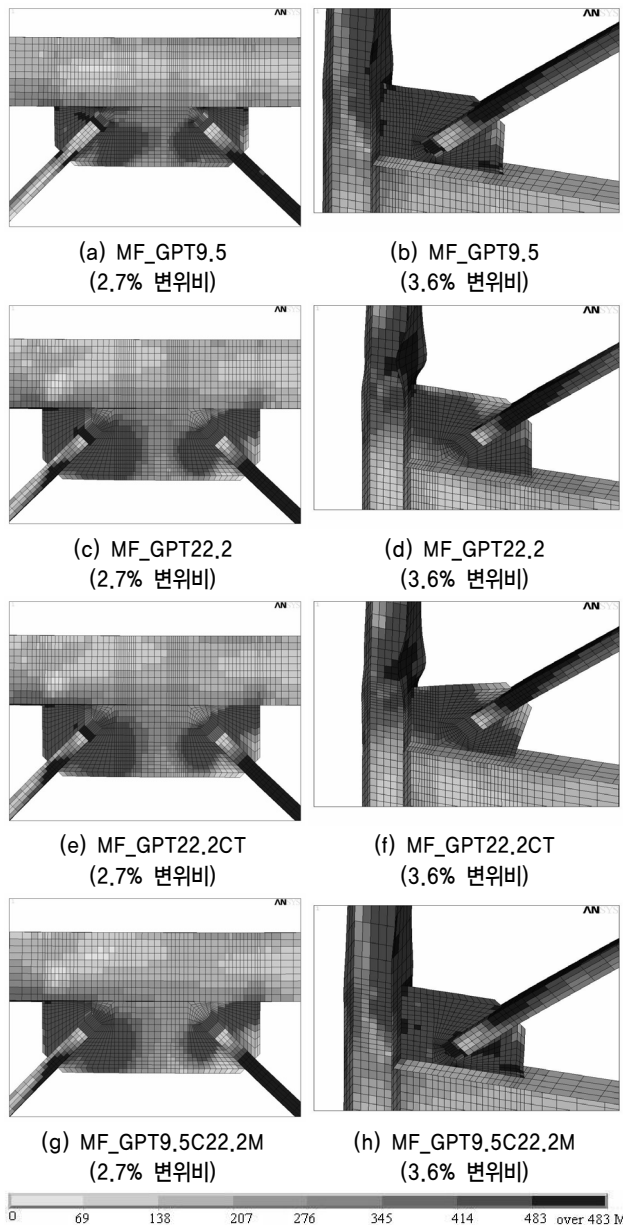
ϵ_{eqv} 한계치를 이용한 크랙과 파단에 대한 일관된 예측은 동일한 메시 크기와 같은 요소 모델의 사용을 요구한다. 이번 연구와 이전 연구의 유사성이 유지되었기 때문에 이 기준들은 이번 연구의 크랙과 파단에 대해서도 유효하다. 중앙부 거싯 플레이트의 초기 크랙은 실험연구가 진행되지 않았기 때문에 실험치를 보정할 수 없었음에도 불구하고 코너 거싯 플레이트에서 얻어진 경계값을 이용, 중앙부 거싯 플레이트의 초기 크랙의 근사치를 얻었다. 그러므로 중앙부 거싯 플레이트의 초기 크랙은 최선의 근사치이고 이 논문에선 잠재적 초기 크랙으로 부른다.

선형 간극 거리를 이용한 모델은 좀 더 작은 거싯 플레이트를 가능케 하고 이것은 거싯 플레이트의 강성을 작게 하며 이것은 다시 그림 5a에서 보듯이 가새의 파단을 늦추는 것으로 이어진다.⁽⁶⁾ 또한 좀 더 작은 거싯 플레이트의 이용은 보와 중앙 거싯플레이트의 연결부의 변형의 요구를 크게 하여, 초기 크랙이나 파단을 빠르게 진행시키는 경향이 있음을 그림 5b에서 볼 수 있었다. 즉, 좀 더 작은 거싯 플레이트의 이용은 거싯 플레이트 용접부의 초기 크랙을 일으키거나 가새의 파단을 늦추게 한다. 가새골조 시스템에서의 주 파단모드는 궁극적으로 가새 중앙부의 파단이다. 하지만 두 경우 모두 연결부의 초기 크랙이 가새 중앙부 파단에 비해 너무 조기에 발생하여 가새 중앙부의 파단 이전에 연결부의 파단이 염려되는 상황이다.

3.3 거시 플레이트 두께와 테이퍼의 영향

미국의 현 지진 설계규정에 의하면 두꺼운 거시 플레이트가 더 좋은 성능을 발휘한다는 것을 내포하고 있지만, 이전 해석 결과는 두껍고 큰 거시 플레이트는 연결부의 강성을 증가시키고 골조 시스템 중 보와 기둥의 조기 항복 가능성을 증가시키며 결국 가새를 조기 파단에 이르게 한다는 것을 보여줬다.⁽⁶⁾

그림 6c와 6d에서 보듯이 두꺼운 거시 플레이트는 거시 플레이트내의 응력 집중 요구는 감소시키지만 거시 플레이트에 인접한 기둥에 국부 좌굴과 비탄성 변형 요구를 포함한 비탄성 거동을 상당히 증가시킨다. 거시 플레이트 두께는 그림 7에서 보듯이 크랙과 파단의 잠재성에 상당한 영향



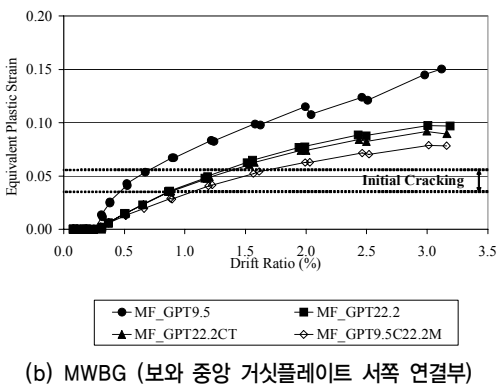
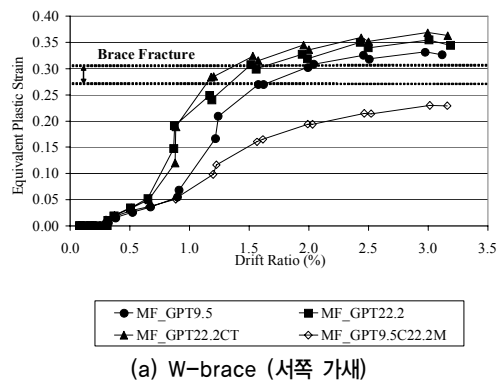
〈그림 6〉 플레이트 두께와 테이퍼

을 미친다.

거시 플레이트의 두께의 증가는 보-거시 플레이트 용접부 초기 크랙에 대한 변위비를 0.5%에서 0.9%로 증가시키는 결과를 가져왔다 (그림 7b). 이것은 거시 플레이트의 감소된 응력집중 현상 때문이었다 (그림 6c). 하지만 가새 파단의 경우 반대의 결과가 나타났다. 즉 거시 플레이트의 두께의 증가는 가새의 파단에 대한 변위비를 1.6%에서 1.1%로 감소시키는 결과를 가져왔다 (그림 7a). 강성과 강도가 높은 거시 플레이트는 가새 중앙부의 짧은 길이에 응력집중을 발생시켜 가새 중앙부에 큰 국부 변형을 가져오고 이는 연성 능력을 저하시켜 가새의 조기 파단을 이르게 한다.

테이퍼 플레이트와 얇은 거시 플레이트 모델의 비교에서도 흡사한 결과를 얻을 수 있다. 즉, 두껍고 테이퍼한 플레이트는 보-거시 플레이트 용접부 초기 크랙을 방지하나 가새 중앙부의 조기 파단을 가져 온다 (그림 7). 테이퍼 플레이트와 두꺼운 거시 플레이트 모델을 비교해 보면 거시 플레이트와 인접 골조의 응력분포 (그림 6)나 보-거시 플레이트 용접부와 가새 중앙부의 변형률 결과 (그림 7)가 서로 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

두꺼운 플레이트의 사용으로 인한 골조의 국부 좌굴과 비탄성 변형 요구를 감소시키고 플레이트 내의 응력 집중 현상을 감소시키기 위해 두께가 다른 두개의 플레이트 사용을



〈그림 7〉 등가소성변형률 (ϵ_{eq})

제안하였다. 즉, 중앙 거싯 플레이트는 22.2mm, 코너 거싯 플레이트는 9.5mm 두께를 사용했다. 그 결과 코너 거싯 플레이트에 인접한 기둥의 국부 좌굴과 비탄성 변형 요구를 상당히 감소시켰고 (그림 6h), 보-거싯 플레이트 용접부 초기 크랙과 가새 중앙부의 파단을 방지하는 결과를 얻었다 (그림 7). 특히 가새 골조의 궁극적 파괴 원인은 가새 중앙부의 파단이므로, 22.2mm 중앙 거싯 플레이트와 9.5mm 코너 거싯 플레이트의 사용의 제안은 이 골조의 연성과 비탄성 변형 능력을 증가시키는 중요한 결과를 얻었다.

4. 결론

이 연구는 역V형 가새골조 연결부 설계를 위한 해석적 연구이다. 유한요소 모델을 이용 다양한 변수 연구를 수행했고 등가소성변형률의 결과를 통해 파단을 예측하였다. 이 연구에서 얻은 주요 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

1. 불균형력을 고려하지 않고 설계한 모델의 경우, 보에 응력 집중 현상이 나타났고 거싯 플레이트에 응력과 변형이 증가했다. 그러므로 부재의 응력 집중 현상과 변형을 방지하고 보의 항복에 의한 골조의 횡강성이 급격히 감소하지 않도록 불균형력을 고려하여 설계해야 한다.
2. 중앙부 거싯 플레이트에 선형 간극 거리를 이용한 모델은 거싯 플레이트 용접부의 초기 크랙을 일으키나 가새의 파단을 늦추게 한다.
3. 두꺼운 거싯 플레이트는 거싯 플레이트내의 응력 집중 요구는 감소시키지만 거싯 플레이트에 인접한 기둥에 국부 좌굴과 비탄성 변형 요구를 포함한 비탄성 거동을 상당히 증가시킨다. 또한 가새 중앙부의 짧은 길이에 응력집중을 발생시켜 가새 중앙부에 큰 국부 변형을 가져오고 이는 연성능력을 저하시켜 가새의 초기 파단을 이르게 한다.
4. 테이퍼 플레이트는 테이퍼 하지 않은 플레이트와 비교할 때, 응력분포나 변형률 결과, 서로 큰 차이가 없음을 알 수 있다.
5. 22.2mm 중앙 거싯 플레이트와 9.5mm 코너 거싯 플레이트를 사용한 모델은 코너 거싯 플레이트에 인접한 기둥의 국부 좌굴과 비탄성 변형 요구를 상당히 감소시켰고, 보-거싯 플레이트 용접부 초기 크랙과 가새 중앙부의 파단을 방지하는 결과를 얻었다. 또한 골조의 연성과 비탄성 변형 능력을 증가시켰다.

감사의 글

본 연구는 2006년 NSF (National Science Foundation)의 지원을 받아 수행된 연구로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. AISC, "Seismic provisions for structural steel buildings," *American Institute of Steel Construction*, Chicago, IL, 2005.
2. Lehman, D. E., Roeder, C. W., Herman, D., Johnson, S., and Kotulka, B., "Improved seismic performance of gusset plate connections," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134, No 6, 890-901, 2008.
3. Foutch, D.A., Goel, S.C., and Roeder, C.W., "Seismic testing of a full scale steel building - Part I," *Journal of Structural Division, ASCE*, No. ST11, Vol. 113, NewYork, 2111-2129, 1987.
4. Uriz, P., and Mahin, S.A. "Seismic vulnerability assessment of concentrically braced steel frames.," *Korean Society of Steel Construction, International Journal of Steel Structures*, Vol. 4, No. 1, Seoul, Korea, 239-248, 2004.
5. Yoo, J. H., "Analytical investigation on the seismic performance of special concentrically braced frames", *a dissertation submitted in partial fulfillment of the Ph. D degree*, Department of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, Washington, 2006.
6. Yoo, J. H., Roeder, C., and Lehman, D., "Analytical performance simulation of special concentrically braced frames." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134, No. 6, 881-889, 2008b.
7. ANSYS, ANSYS Theory Reference, *ANSYS Inc.*, Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA, 2005.
8. Liu, J., and Astaneh-Asl, A., "Cyclic testing of simple connections including effects of the slab.," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No 1, 32-39, 2000.
9. Yoo, J. H., Lehman, D., and Roeder, C., "Influence of connection design parameters on the seismic performance of braced frames.," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64, No 6, 607-623, 2008a.