

중심가새골조의 순단면 파단에 관한 해석적 연구

Analytical Study of Net Section Fracture in Special Concentrically Braced Frames

유 정 한¹⁾

Yoo, Jung Han

요약 : 파괴모드는 저항력과 비탄성 변형 능력의 저하를 일으키는 균열이나 파단으로 귀결된다. 특수중심가새골조의 잠재적 파괴모드는 가새의 균열이나 파단, 가새나 거시 플레이트의 순단면 파단, 거시 플레이트용접의 균열, 볼트의 전단균열, 블록전단파단, 그리고 거시 플레이트의 좌굴 등을 포함하고 있다. HSS 튜브가새는 특수중심가새골조에 자주 사용되고, 가새의 순단면 파단은 거시 플레이트가 가새로 삽입되는 홈의 끝 부분에 가새의 순단면을 통해 발생한다. 이 파괴모드는 인장파괴모드로 분류되고 급격한 강도저하와 취성적인 거동을 보인다. AISC 디자인 규준에선 순단면 보강을 요구하고 있다 (AISC 2001). 이 논문에서, 순단면 보강의 필요성에 대해 논의한다. 먼저, 미국 버클리대학교에서 수행됐던 순단면 파단실험을 유한요소모델을 이용한 이 실험의 모델링을 통해 소개한다. 실제 골조에서의 순단면 파단의 가능성을 조사하기 위해, 홈이 있는 중심가새골조를 유한요소법을 이용 모델링 하고, 인장지배의 근거리지진 이력을 적용시킨다. 이는 이력이 순단면 파단의 가장 중요한 인자라는 이전 해석 결과에서 기인한 것이다. 순단면 보강의 필요성과 인장지배의 근거리지진 이력의 영향에 대해 조사한다.

ABSTRACT : Failure modes result in fracture or tearing, which may cause deterioration of resistance and reduction of inelastic deformation capacity. The potential failure modes for Special Concentrically Braced Frames (SCBFs) include fracture or tearing of the brace, net section fracture of the brace or gusset plate, fracture of the gusset plate welds, shear fracture of the bolts, block shear, excessive bolt bearing deformation, and buckling of the gusset plate. HSS tubular braces are commonly used in SCBFs, and net section fracture of the tubular brace may also occur through the brace net section at the end of the slot cut into the tube to slip over the gusset plate. This failure mode is categorized as a tension failure mode, and may cause dramatic loss of resistance and brittle behavior. Net section reinforcement is required according to AISC design specifications (AISC 2001). In this paper, the need to reinforce the net section area was discussed. Initially, the results of the net section fracture tests done by the University of California in Berkeley were presented with the modeling of these tests using FE models. To investigate the possibility of net section fracture in an actual frame, the slot end hole model was adapted to the frame FE model, and alternate near-fault histories were applied with tension-dominated cycles, since previous analyses showed that loading history was the most critical factor in net section fracture. The need for this reinforcement (cover plate) and the tension-dominated near-fault history were investigated.

핵심용어 : 순단면파단, 특수중심가새골조, 거시 플레이트, 유한요소해석, 비탄성 반응

KEYWORD : net-section fracture, special concentrically braced frame, gusset plate, finite element analysis, inelastic response

1. 서론

특수중심가새골조의 비탄성 횡응답은 가새의 인장 항복과 가새의 비탄성 좌굴 후 거동에 의해 지배된다. (AISC 2005). 특수중심가새골조에서의 가새는 거시 플레이트를 통해 골조의 기둥과 보로 연결된다. 가새의 비탄성 변형 요구는 가새의 연결부에 대한 심각한 하중과 변형 요구로 이어진다. 특수중심가새골조의 거시 플레이트는 가새의 인장 및 압축 성능을 지지하

는 동시에 반복하중에 의한 변위에 대응해야 한다. 연결부의 조기파괴 또는 파단은 시스템의 저조한 성능을 유발한다. 가새골조시스템의 또 다른 조기 파괴모드의 가능성은 가새의 순단면 파단이다. 순단면 파단은 거시 플레이트와 연결되는 가새의 홈 끝에서 일어난다. 이 파괴모드는 인장 파괴모드로 분류되고 급격한 강도저하와 취성적인 거동의 원인이 된다. 가새의 순단면 파단의 사전 조사로써 Yang의 실험이 적용됐고 (Yang and Mahin 2005) 실제 골조에서의 순단면 파단의 가능성을

1) 교신저자. 대한주택공사 도시재생사업단 선임연구원, 공학박사
(Tel. 031-389-6423, Fax. 031-381-9922, E-mail: happyjh@gmail.com)

본 논문에 대한 토의를 2009년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

조사하기 위해, 흠이 있는 중심가새골조를 유한요소법 (FEM) 을 이용 모델링하였다. 워싱턴대학교에서 인장지배의 근거리 지진 이력을 적용시킨 두개의 중심가새골조 실험체가 순단면 파단을 조사하기 위해 수행됐다. 실험적 연구와 해석적 연구가 이 조기파괴에 대한 조사를 위해 진행 중이고 이 논문은 가새골조 시스템성능에 대한 영향을 요약하였다. 해석적 연구는 연계된 실험적 연구를 발전시키도록 도움을 줄 것이며 순단면 파단에 대한 이해를 돕는 길잡이가 될 것이다.

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 크래킹이나 파단의 비교적 좋은 척도라는 것을 보여준다. 그리고 이때의 ϵ_{eqv} 한계치는 실험에서 얻어진 초기 크래크 파단으로부터 얻어진 것이다 (Yoo 2006, Yoo *et al.* 2008b). ϵ_{eqv} 는 다음과 같이 von Mises 의 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. ϵ_{eqv} 의 한계치를 정의함으로 초기 크래킹과 그 진전은 상당히 정확하게 예상할 수 있었다. 이 ϵ_{eqv} 의 한계치는 크래킹의 위치나 상태에 따라 바뀌지만 일단 한계치가 주어진 일련의 상황에 의해 얻어진다면 그것은 또 다른 실험체에 대한 크래킹의 예측이 가능하게 한다. 이 ϵ_{eqv} 개념은 유한요소 타입과 메시 크기가 동일하게 유지되는 한 다른 형태나 다른 구조적 상황에도 적용될 것이다. 그러므로 이전 논문에서 (Yoo *et al.* 2008b) 개발되었던 ϵ_{eqv} 한계치는 동일한 메시 크기와 같은 요소 모델을 이용하는 한 여기에서도 유효하다.

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

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

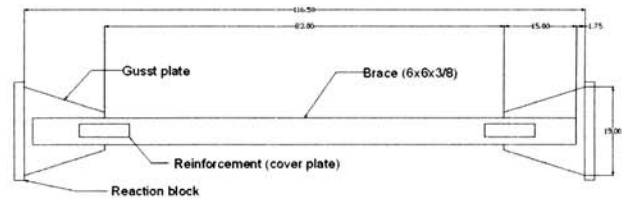
여기서, $\sigma_x, \sigma_y,$ 등은 요소의 응력이다. σ_{eqv} 의 결과는 응력 곡선도를 이용하여 나타내었다. 곡선도의 색은 그림 7에서 보

듯이 σ_{eqv} 이 커짐에 따라 더욱 어두워진다. σ_{eqv} 은 0에서 450 MPa까지 분포되어 있다. 거실 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. ϵ_{eqv} 도 국부 거동을 조사하고 초기 크래킹이나 파괴를 평가 하는데 사용된다.

2. 해석적 연구 프로그램

2.1 버클리대학교 실험

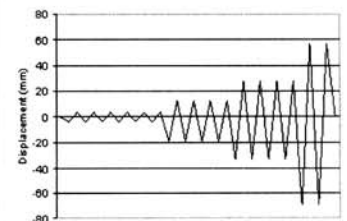
Yang에 의해 수행된 6개의 실험체 중 2개가 순단면 파단을 조사하기 위해 이용되었다 (Yang and Mahin 2005). 그림 1은 실험 set-up과 실험 프로그램, 하중이력, 유한요소모델을 보



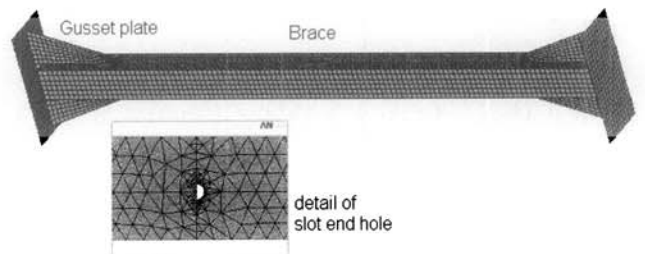
(a) 실험체 형상



(b) Test Set-up



(c) 하중 이력



(d) 유한요소모델

그림 1. 순단면 파단의 Test Set-up, 하중 이력 및 유한요소모델 (Yang and Mahin 2005)

여준다. 거시 플레이트 (두께: 22.2mm) 한쪽은 축방향으로 자유도를 부여하지만 면의 방향은 자유도와 비틀림을 제한한 반면 다른 한쪽은 반력블록에 고정시켜 자유도를 제한하였다.

두개의 실험체는 (순단면이 보강되지 않은 가새와 보강 가새) ANSYS 프로그램 (ANSYS 2005)을 이용하여 유한요소 모델로 생성됐다 (그림 1d). 유한요소모델은 3-노드 삼각형과 4-노드 사각형 쉘 요소로 구성되었다 (Shell181). 가새의 홈 부분은 삼각형 쉘 요소로 비교적 조밀한 메시를 만들었고 그 외의 부분은 사각형 쉘 요소로 모델링을 하였다. 하중 이력은 해석을 위해 변위제어를 택했고 그림 1c와 같다.

알파벳 글자는 각 해석의 변수의 구분을 명확히 하기 위해 의미를 부여했다. (표 1)

- BGPT22.2hole은 골조가 아닌 가새 (Brace)만으로 22.2mm 두께의 거시 플레이트 (22.2mm Gusset Plate Thickness)와 가새 홈 (hole)을 가진 모델
- CP는 위 모델에 순단면 보강 (Cover Plate)이 된 모델을 의미한다. (그림 1a).

순단면이 보강되지 않은 가새 (미보강 가새)와 보강된 가새 (보강 가새)에 대한 실험과 유한요소모델에서 얻어진 힘-변위 관계는 그림 2와 같다. 미보강 가새 (BGPT22.2hole)는 가새의 인장변위가 32mm일 때 파괴가 일어났고, 보강 가새 (BGPT22.2CPHole)는 파괴없이 전체 하중 사이클을 수행하였다. 유한요소모델의 결과는 실험에서 얻어진 모든 결과와 아주 흡사하게 나타났다.

표 1. 해석모델의 제원

분류		변수	거시 플레이트 크기 (mm)	거시 플레이트 두께 (mm)
가새	홈이 있는	두꺼운 거시	BGPT22.2hole	22.2
		두꺼운 거시	BGPT22.2CPHole	22.2
골조	홈이 없는	얇은 거시	GPT9.5 (HSS 5)	635 x 533 / 9.5
		두꺼운 거시	GPT22.2LB	724 x 622 / 22.2
	GPT22.2LBPCP		724 x 622 / 22.2	
	홈이 있는	얇은 거시	GPT9.5hole	635 x 533 / 9.5
			GPT9.5CPHole	635 x 533 / 9.5
		두꺼운 거시	GPT9.5LBhole	635 x 533 / 9.5
GPT22.2LBhole			724 x 622 / 22.2	
GPT22.2LBPCPHole	724 x 622 / 22.2			

미보강 가새는 그림 3a와 c에서 보는 것처럼 실험 중 홈 끝 부분에 국부 항복과 홈 주위에 응력집중이 발생하였다. 급속 넥킹은 초기 크랙킹을 일으키고 결국 파단으로 이어진다. 관찰

된 손상정도는 그림 3b와 d에서 보는 것처럼 유한요소모델 결과와 비교하였다. 실험과 유한요소모델의 힘-변위 관계와 국부 거동의 비교를 기초로 하여 유한요소모델은 실험의 결과를 상당히 잘 시뮬레이션 했다고 결론지을 수 있다.

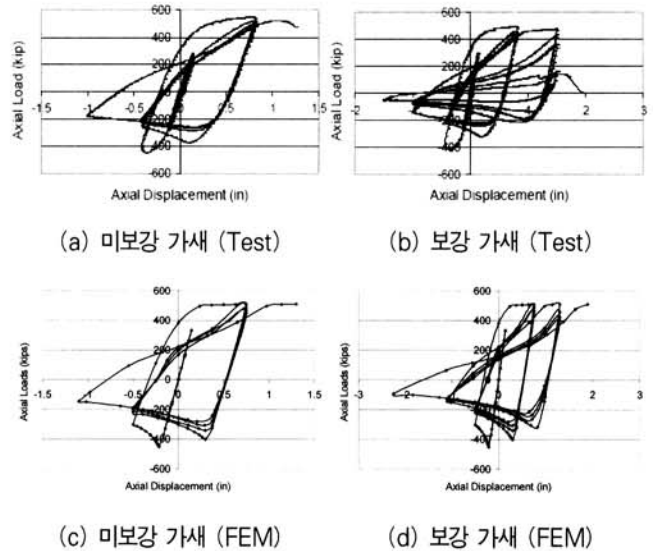


그림 2. 하중-변위 곡선

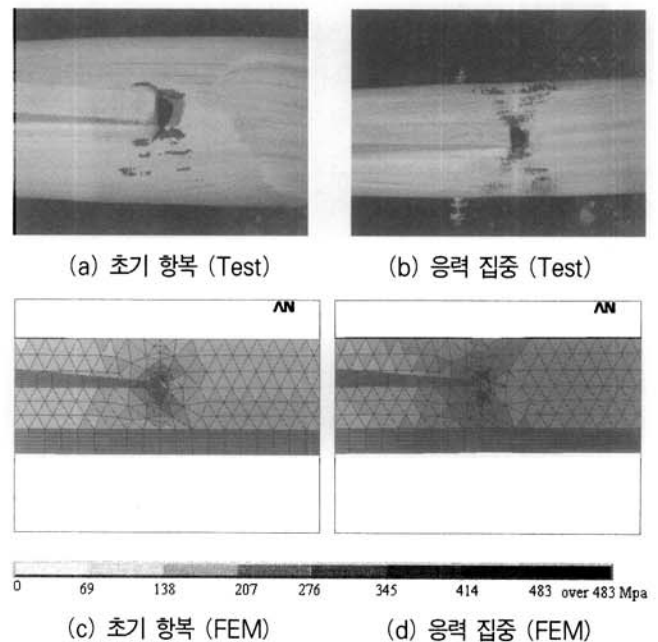


그림 3. 미보강 가새 홈의 응력 집중

그림 4는 미보강 가새와 보강 가새에 대한 홈 부분과 가새 중심의 ϵ_{eqv} 를 나타낸다. 미보강 가새의 경우, 홈 부분의 ϵ_{eqv} 의 급격한 증가를 볼 수 있고, 그 값은 가새 중심에서의 ϵ_{eqv} 보다 크게 나타나는 것을 이 그림에서 볼 수 있고 이것은 결국 조기 파괴로 이어졌다. 순단면 파단시의 ϵ_{eqv} 는 0.41이고 이것은 가새

의 인장변위가 32mm 일 때 일어났고 이 값은 순단면 파단을 예측하기 위한 ϵ_{eqv} 한계치로 사용됐다. 보강 가새의 경우, 전체 하중 사이클을 수행했고 가새 중심에서 높은 ϵ_{eqv} 값을 보였다.

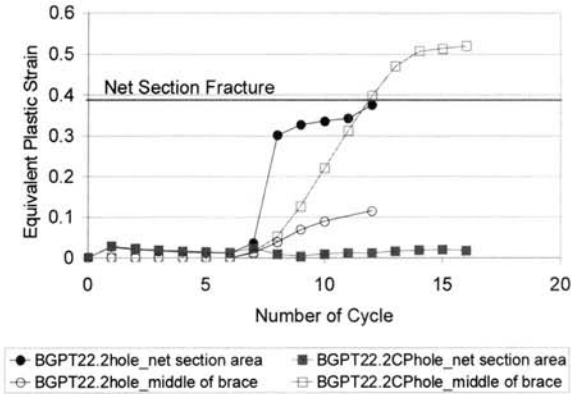


그림 4. 미보강/보강 가새의 등가소성변형률 (ϵ_{eqv})

2.2 워싱턴대학교 실험

특수중심가새골조와 거싯 플레이트의 반응을 시뮬레이션하기 위해 유한요소모델을 (ANSYS 2005) 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 (Yoo *et al.* 2008b). 유한요소모델은 3-노드 삼각형과 4-노드 사각형 쉘 요소로 구성되었고 요소의 각 노드는 6-자유도를 포함하고 있다 (Shell181). 가새의 홈부분은 삼각형 쉘 요소로 비교적 조밀한 메시를 만들었고 그 외의 부분은 사각형 쉘 요소로 모델링을 하였다. 이 요소는 두께가 얇은 쉘 구조에서 중간 두께의 쉘 구조까지 사용된다 (ANSYS 2005). 대변형 요소 공식은 좌굴을 시뮬레이션하기 위해, 이선형의 이동경화형 모델은 반복 비탄성 거동을 시뮬레이션하기 위해 사용됐다. 해석에서 사용된 물성치는 실험에서 얻어진 측정값을 기초로 하였다 (Lehman *et al.* 2007).

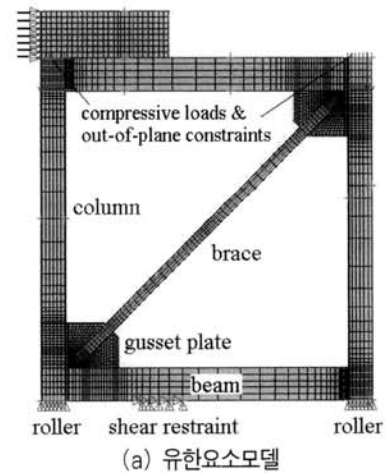
그림 5는 전형적인 유한요소모델을 보여준다. 하위 보의 아래 플랜지의 병진 자유도는 실험의 볼트 지지 부분으로써 골조의 면내 병진 변위를 제어하기위해 구속됐다. 각 기둥 하부는 실험체에서 이 부분의 병진 구속이 없으므로 이동지점으로 모델링하였다. 각 기둥 상부는 면외 방향의 변위를 제어하기 위해 구속하였다. 유한요소모델의 추가 면외 방향 구속은 실험에서의 골조의 횡 지지부에 적용하였다.

볼트로 접합된 보-기둥 전단 연결부를 모델링하기 위해 비선형 스프링 요소를 (COMBIN39) 사용했고 여기에 이용된 값

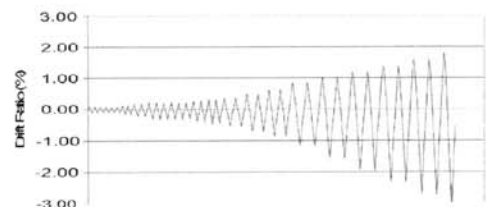
은 Liu 의 실험에서 얻어진 비선형 힘-변위 곡선을 기초로 하여 구했다 (Liu *et al.* 2000). 유한요소 솔루션의 수렴과 정확도를 확보하고 가능한 짧은 실행 시간을 얻기 위해 메시 세분화에 대한 연구가 연구 초기에 수행됐고, 보-기둥, 거싯 플레이트 연결부에 비교적 조밀한 메시가 (약 25mm x 25mm) 사용됐다. 그 외의 항복이 일어나지 않은 곳이나 제한된 탄성 변위가 일어난 부분은 비교적 크기가 큰 메시로 모델링하였다. 모델에 대한 더 자세한 내용과 모델링 과정은 이전 논문에서 볼 수 있다 (Yoo 2006, Yoo *et al.* 2008b).

일반적으로 골조의 형상과 부재 크기는 실험체와 일치하며 이는 모든 실험체에 유효하다. 실험체 HSS 5 (Lehman *et al.* 2007)와 GPT9.5는 동일하며 GPT9.5는 기준 모델로 사용됐다. HSS 5는 W16x45 보, W12x72 기둥, 45° 대각 HSS 5x5x3/8 가새, 그리고 거싯 플레이트 (635mm x 533mm, 두께 9.5mm)로 구성되어 있다. WF강은 A922강이고 거싯 플레이트는 A572강, 가새는 A500 Type B/C강이다. 알파벳 글자는 각 해석의 변수의 구분을 명확히 하기 위해 의미를 부여하였다. (표 1)

- GPT9.5와 GPT22.2는 9.5mm와 22.2mm 두께의 거싯 플레이트 (Gusset Plate Thickness)를 가진 모델
- LB는 크기가 큰 보를 (Large Beam) 가진 모델
- CP는 순단면 보강 (Cover Plate)이 된 모델 (그림 6)을 의미 한다



(a) 유한요소모델



(b) 하중 이력

그림 5. 유한요소모델과 하중 이력 (Yoo *et al.* 2008b)

3. 해석결과

3.1 순단면 보강 효과 - 흠이 없는 경우

보의 크기에 대한 연구 결과, 두꺼운 거싯 플레이트를 가진 큰 보는 가새가 거싯플레이트로 연결되는 순단면부에 응력의 상당한 증가를 초래한다는 결과가 있었다(Yoo *et al.* 2008a). 이것은 그림 7a의 매우 진한 곡선도에 보듯이 응력의 상당한 증가를 나타낸다. 보강 가새는 이 부분의 응력 집중을 감소시킨다(그림 7b).

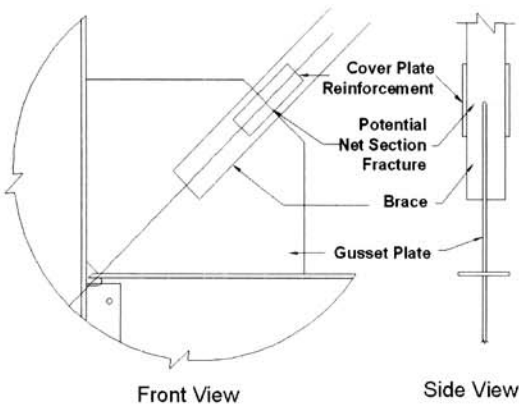
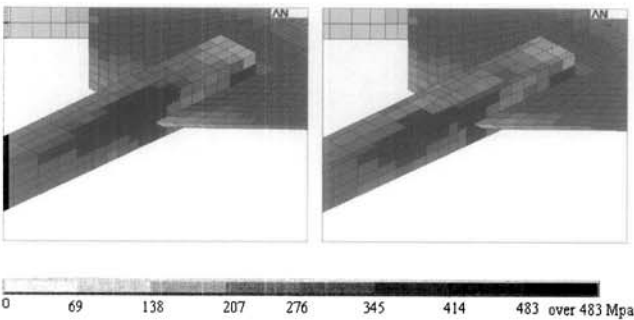


그림 6. 가새-거싯 플레이트 연결부



(a) GPT22.2LB (b) GPT22.2LBBCP

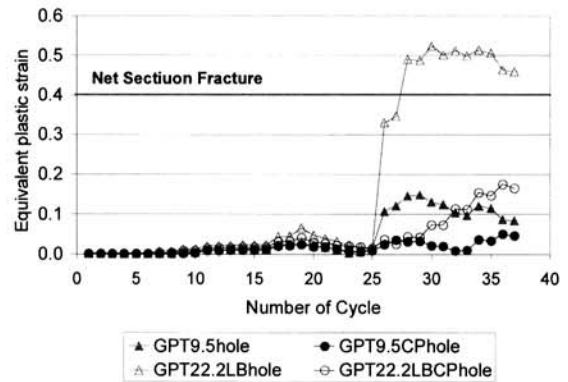
그림 7. 등가응력도 (미보강 vs. 보강)

3.2 순단면 보강 효과-흠이 있는 경우

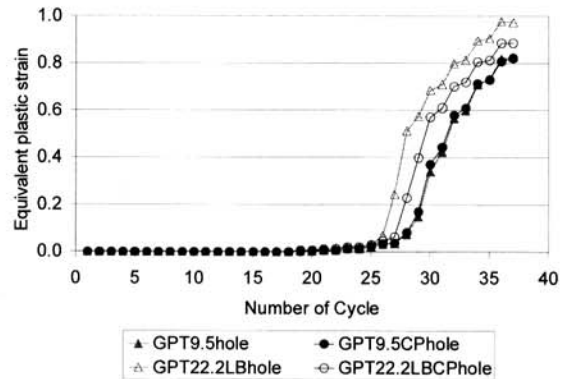
실제 골조에서의 순단면 파단의 가능성을 조사하기 위해, 흠이 있는 모델을 골조 유한요소모델에 적용시킨다. 두가지의 다른 경우를 평가하였다: 미보강골조 (GPT9.5hole과 GPT22.2LBhole)와 보강골조 (GPT9.5CPhole과 GPT22.2LBCPhole). 거싯 플레이트의 두께와 보의 크기는 가새가 거싯플레이트로 연결되는 순단면부에 비탄성 응력과 변형의 상당한 영향을 주므로 GPT9.5와 GPT22.2LB가 이 연구를 위해

재구성됐다.

그림 8a에서 보듯이 보강골조모델을 사용했을 때 순단면부의 ϵ_{eqv} 는 감소하였다. 미보강 GPT22.2LBhole는 높은 ϵ_{eqv} 를 보였고 이는 다른 모델들에 비해 초기 순단면 파단의 가능성의 증가나 연성능력의 감소를 일으킨다. 가새 중앙의 ϵ_{eqv} 의 경우 모델 간 변동이 적었고 보강골조가 사용되었을 때 ϵ_{eqv} 가 감소하였다(그림 8b). 순단면 보강은 순단면부의 변형 및 응력을 줄이는 효과가 있었다.



(a) 순단면부



(b) 가새 중앙부

그림 8. 미보강/보강 골조의 등가소성변형률 (ϵ_{eqv})

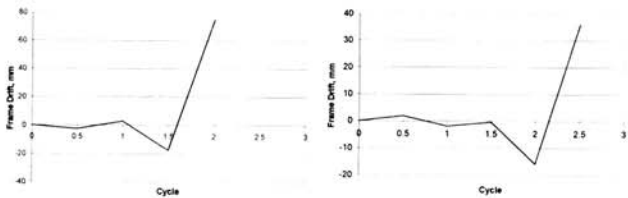
3.3 순단면 보강 효과-근거리 지진 이력을 적용한 경우

이력이 순단면 파단의 중요한 인자이므로 (Yang and Mahin 2005) 인장지배의 근거리지진 이력을(그림 9a와 b) 적용시켰다. 실험과 유한요소모델의 힘-변위 관계와 국부 거동의 비교를 기초로 하여 유한요소모델은 실험의 결과를 상당히 잘 시뮬레이션 하였다고 결론지을 수 있다(그림 9에서 11). 골조의 강성과 저항력을 비교해보면, 실험치와 해석치가 아주 흡사한 것을 알 수 있다(그림 9c 와 d). GPT9.5LBhole의 최대 변위연성도는 2.05%로 GPT22.2LBhole의 최대 변위연성도의 (1.15%) 거의 두배에 가깝다. 이는 두꺼운 거싯 플레이트

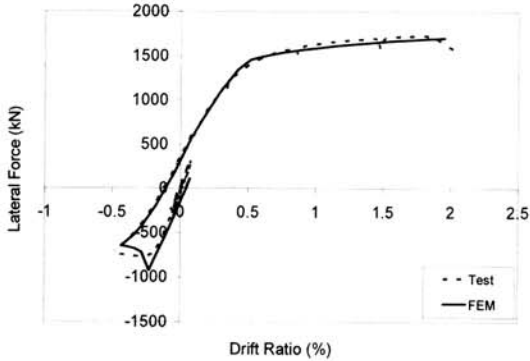
를 가진 큰 보는 가새가 거싯플레이트로 연결되는 순단면부에 응력의 상당한 증가를 초래하여 초기 순단면 파단의 가능성의 증가시킨다는 사실에서 온 것이다.

실험은 다음의 부분에서 응력 집중과 손상을 보여준다.

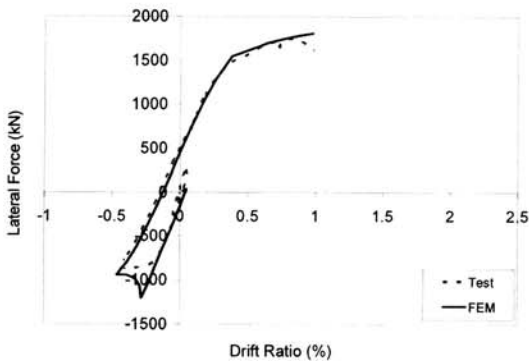
- 그림 10a의 실험 결과와 해석 결과에서 묘사된 것처럼 GPT9.5LBhole의 거싯 플레이트에는 상당한 국부 응력이 발생하였다.



(a) 하중 이력 (GPT9.5LBhole) (b) 하중 이력 (GPT22.2LBhole)



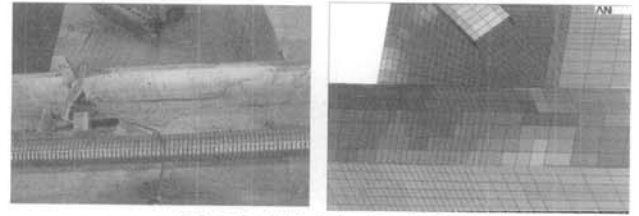
(c) 힘-변위 곡선 (GPT9.5LBhole)



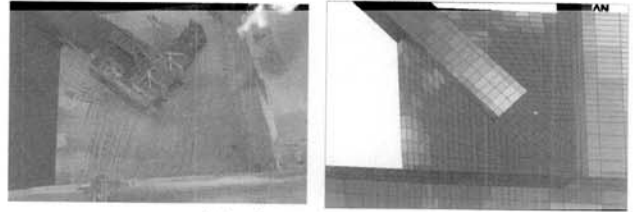
(d) 힘-변위 곡선 (GPT22.2LBhole)

그림 9. 하중 이력과 힘-변위 곡선

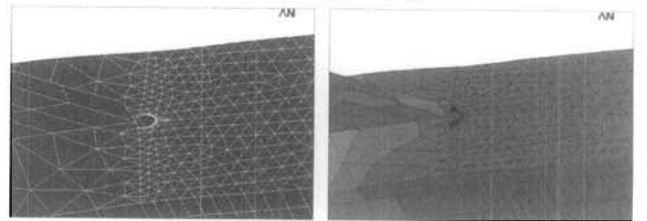
- 거싯 플레이트와 연결된 기둥의 응력 집중과 손상은 실험 결과와 해석 결과에서 나타났다. 이는 거싯 플레이트의 강성과 크기, 그리고 실험 경계조건에서 생긴 전체 골조의 Frame Action 때문이다. 즉 강접합으로 되어 있는 기둥, 보와 거싯 플레이트는 상당한 휨 모멘트를 발생시키고 기둥은 보와 거싯 플레이트의 회전에 저항하는 상당부분을 담당한다. (그림 10b, 11a, 11b)



(a) 기둥의 플랜지 안쪽의 항복



(b) 거싯 플레이트의 항복

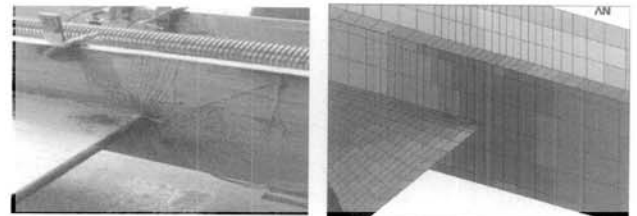


(c) 순단면부의 변형

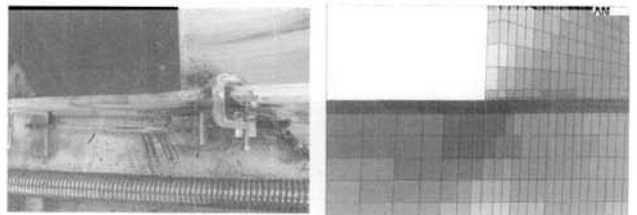
(d) 순단면부의 항복



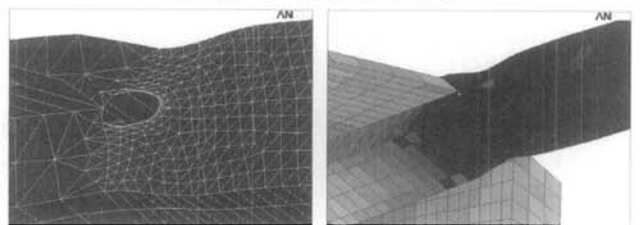
그림 10. GPT9.5LBhole모델의 손상 비교



(a) 기둥의 플랜지의 항복



(b) 기둥 및 거싯 플레이트의 항복



(c) 순단면부의 변형

(d) 순단면부의 항복



그림 11. GPT22.2LBhole모델의 손상 비교

- 두꺼운 거시 플레이트 (GPT22.2LBhole)를 사용한 경우, 얇은 거시 플레이트 (GPT9.5LBhole)를 사용한 경우와 비교해 보면, 거시 플레이트와 가새의 연결부에서의 큰 비탄성 변위를 볼 수 있다 (그림 11c). 가새의 홈 부분의 국부 변위는 높은 수준의 응력 집중과 변위로부터 발생하였다 (그림 10d와 11d). 결과를 뚜렷이 하고 비교를 용이하게 하기 위해, 그림 10c, 10d, 11c, 11d의 변형은 원래크기의 5배 크게 변형시킨 그림을 유념하라. 유한요소모델은 크래킹이나 파단을 포함하진 않지만 소성 응력 집중과 변위는 실험에서 얻어진 결과를 잘 시뮬레이션 하였다. 이 국부 집중은 실험에서 얻어진 초기 파단으로 귀결된다.

얇은 거시 플레이트를 사용했을 때, 순단면부의 ϵ_{eqv} 는 상당히 감소하였다 (그림 12). 반대로 두꺼운 거시 플레이트를 사용한 경우는 순단면부에 응력의 상당한 증가를 초래하여 초기 순단면 파단의 가능성의 증가시키고 연성능력을 저하시킨다. 가새 중앙의 ϵ_{eqv} 값은 낮고 모델 간 변동도 적었다. 얇은 거시 플레이트의 사용은 순단면부의 변형 및 응력을 줄이는데 효과적 이었다.

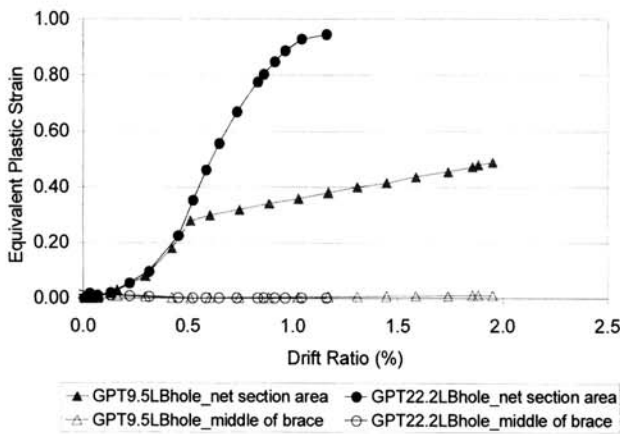


그림 12. 골조의 등가소성변형률 (ϵ_{eqv})

6. 결론

이 연구는 중심가새골조의 순단면 파단에 관한 해석적 연구이다. 실험 결과에서 얻어진 힘-변위 곡선을 이용한 포괄적인 비교와 등가소성변형률과 등가응력도를 이용한 국부적인 비교를 통해 유한요소모델의 타당성을 검증하였다. 검증된 모델을 이용 다양한 변수 연구를 수행했고 등가소성변형률의 결과를 통해 파단을 예측하였다. 이 연구에서 얻은 주요 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

- (1) 가새와 거시 플레이트로 연결되는 순단면부의 미보강 가새는 초기 파단이 일어났고 보강 가새는 파괴없이 전체 사이클을 수행하였다. 즉 순단면부의 응력 집중과 변형을 줄이기 위해 보강이 필요하다.
- (2) 두꺼운 거시 플레이트에 큰 보를 가진 골조는 순단면부가 보강되어 있지 않은 경우 순단면부의 응력 집중을 상당히 증가시킨다. 즉 얇은 거시 플레이트의 사용이 효과적이다.
- (3) 인장지배의 근거리지진 이력이 응력 집중과 변형을 발생시켜 순단면 파단으로 이어지는 주요인자 (Yang and Mahin 2005)이지만 얇은 거시 플레이트의 사용과 가새와 거시 플레이트로 연결되는 순단면부의 보강으로 이를 저감시킬 수 있다.

참고 문헌

AISC, (2001) Manual of Steel Construction Load and Resistance Factor Design, 3rd Edition, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL

AISC, (2005) Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL

ANSYS, (2005) ANSYS Theory Reference, ANSYS Inc., Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA

Lehman, D. E., Roeder, C. W., Herman, D., Johnson, S., and Kotulka, B., (2008) Improved Seismic Performance of Gusset Plate Connections. *Journal of Structural Engineering*, vol. 134, No 6, pp.890-901

Liu, J., and Astaneh-Asl, A.,(2000) Cyclic Testing of Simple Connections Including Effects of the Slab. *Journal of Structural Engineering*, vol. 126, No 1, pp. 32-39

Yang, F. and Mahin, S., (2005) Limiting Net Section Fracture in Slotted Tube Braces, Steel Tips, *Structural Steel Educational Council*, Moraga, California

Yoo, J. H., (2006) 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.

Yoo, J. H., Lehman, D., and Roeder, C.,(2008a) Influence of Connection Design Parameters on

the Seismic Performance of Braced Frames. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, No 6, pp. 607-623

Yoo, J. H., Roeder, C., and Lehman, D.,(2008b) Analytical Performance Simulation of Special

Concentrically Braced Frames. *Journal of Structural Engineering*, vol. 134, No 6, pp. 881-889

(접수일자 : 2008. 11. 14 / 심사일 2008. 11. 19 / 게재확정일 2009. 1. 28)