

웨브를 볼트로 접합한 보 플랜지 절취형(RBS) 철골모멘트접합부의 내진설계 및 성능평가

Seismic Design and Testing of Reduced Beam Section Steel Moment Connections with Bolted Web Attachment

이 철 호¹⁾ · 김 재 훈²⁾

Lee, Cheol Ho · Kim, Jae Hoon

요약: 보 플랜지 절취형 (Reduced Beam Section, RBS) 내진 철골모멘트접합부의 최근 실험결과를 살펴보면, 보 웨브를 볼트 접합한 시험체는 보 웨브를 용접한 시험체에 비해 조기에 스캘럽에서 취성파단이 발생하는 열등한 내진성능을 나타냈다. 과거 여러 연구자들이 수행한 실험 결과 및 본 연구의 수치해석 결과를 종합해 볼 때, 이러한 접합부의 조기 취성파괴는 고전 휨이론과 매우 다른 응력전달 메카니즘에서 기인하는 웨브 볼트의 슬립, 그리고 재료의 인성이 가장 낮은 스캘럽 부근의 응력집중과 밀접한 관련이 있는 것으로 분석된다. 본 연구에서는 실험 및 해석결과를 바탕으로 RBS 접합부의 실제 응력전달경로에 부합되는 새로운 보 웨브 볼트 설계법 및 개선된 상세를 제시하고 실험대 실험을 통하여 방안의 타당성을 입증하였다.

ABSTRACT: Recent test results on reduced beam section (RBS) steel moment connections show that specimens with a bolted web connection tend to perform poorly due to premature brittle fracture of the beam flange at the weld access hole. A review of previous test results indicates that the higher incidence of base metal fracture in bolted-web specimens is related, at least in part, to the web bolt slippage and the high stress concentration at the weld access hole with the lowest material toughness. The practice of providing web bolts uniformly along the beam depth based on the classical beam theory is questioned in this paper. A new seismic design procedure, which is more consistent with the actual load path identified from the analytical and experimental studies, is proposed together with improved connection details. A test specimen designed following the proposed procedure exhibited a cyclic connection rotation capacity sufficient for special moment frames without fracture.

핵심용어: 보 플랜지 절취형 단면, 철골모멘트접합부, 볼트접합, 슬립, 취성파괴, 내진설계

KEYWORDS: reduced beam section, steel moment connection, bolted connection, slip, brittle fracture, seismic design

1. 서론

1994년 미국의 노스리지 및 1995년 일본의 고베 지진 당시, 보-기둥 용접 모멘트접합부에서 조기 취성파괴가 발생하여 막대한 피해가 야기됨에 따라, 이후, 다양한 종류의 고연성 접합 상세가 제시되어 왔다. 이 가운데 RBS (Reduced Beam Section, Dogbone) 접합부는 여러 연구자(Chen 1996; Plumier 1997; Zekioglu 등 1997; Engelhardt 등 1998)에 의해 수행된 실험대 실험을 통하여 뛰어난 연성

능력이 지속적으로 입증되었으며, 가장 대표적인 저비용/고연성 내진상세로 자리매김하고 있다. 이 접합법은 기둥 플랜지에서 약간 떨어진 위치의 보 플랜지 일부를 절취하여, 이 부분이 마치 "structural fuse"와 같이 기능하도록 하여 용접부의 취성파괴를 방지하고 뛰어난 연성능력을 확보하는 방안이다. 비교적 단기간 내에 널리 받아들여진 RBS 접합부는 아직까지 면밀히 검토되지 않은 설계상의 문제가 다수 남아 있다(Jones 등 2002; Gilton and Uang, 2002; Chi and Uang, 2002). 특히 보 웨브의 접합문제는 좀더 많은 연구가

1) 정희원, 서울대학교 건축학과 부교수, 공학박사
(Tel. 031-370-9540, Fax. 031-370-9559, E-mail: ceholee@snu.ac.kr)
2) 서울대학교 건축학과 박사과정(E-mail:kaine@chol.com)

본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

필요하다. 성공적 결과를 보여준 시험체의 대부분은 보 플랜지 및 보 웨브를 모두 그루브 용접한 경우이다(Jones 등 2002). 보 웨브를 볼트로서 기둥 플랜지와 접합하면 접합 비용을 더욱 절감할 수 있으므로 최근에 국내외에서 보 웨브를 볼트접합한 실험연구가 진행된 바가 있다(이철호 등 2002; Jones 등 2002). 그러나 보 웨브와 플랜지를 모두 용접한 시험체에 비해 월등히 높은 빈도의 접합부 취성파괴가 보 웨브를 볼트로 접합한 시험체에서 발생하였다. 하지만 현재까지 그 이유가 설득력있게 제시되지 않고 있다. 본 연구에서는 초 등휨이론에 기초한 현행의 보 웨브 접합부 설계법에 문제가 있음을 지적하고, 접합부에서의 실제 응력전달경로를 실험과 수치해석을 통해 파악하였다. 이 결과를 기초로 실제 응력전달 경로에 부합하는 새로운 보 웨브 볼트접합 설계법을 제안하고 파일럿 테스트를 통하여 설계법의 타당성을 검증하였다.

2. 기존 실험결과와 고찰

그림 1은 본 연구자에 의해 최근에 수행된 보 웨브를 볼트 접합한 RBS 접합부 실험대 시험체의 상세를 보여주고 있다(Lee 등 2004; Lee 등 2005). RBS접합부의 설계는 Iwankiw 와 Engelhardt 등이 제시한 설계절차(Iwankiw 1997; Engelhardt 등 1998)에 준하여 수행하였다. 보 웨브의 접합방법에 따른 효과를 직접적으로 비교하기 위해서 보 웨브를 용접한 시험체 2개와 보 웨브를 볼트 접합한 2개의 시험체로서 실험프로그램을 구성하였다. 보 웨브의 볼트 접합부는 "slip-critical condition"이 만족되도록 설계하였다. 즉 일반적 설계관행대로 RBS부의 소성힌지가 변형경화 소성모멘트 도달시에 예상되는 최대 보전단력에 대해 보 웨브볼트의 미끄러짐이 발생치 않도록 설계하였다. 강재의 깨끗한 자연표면(clean mill scale)에서 대응되는 마찰계수로 0.33을 가정하였을 때 8개의 F10T-M22 고장력 볼트가 필요한 것으로 산정되었다. 검력토크렌치로서 소정의 설계볼트장력 201 kN을 도입하였다. 볼트의 파단강도 및 보 웨브의 지압강도는 예상 최대 보전단력의 2배 이상에 이른다. 가력은 SAC(2000)의 변위제어 반복하중 프로그램(SAC 2000)을 사용하였다. 그림 2는 위에서 언급한 4개의 시험체의 실험결과에서 얻어진 이력곡선을 비교한 것이다. 각 시험체의 명칭의 의미는 DB700-SW: 강한 패널존과 보 웨브 용접, DB700-SB: 강한 패널존과 보 웨브 볼트접합, DB700-MW: 균형 패널존과 보 웨브 용접, DB700-MB: 균형 패널존과 보 웨브 볼트접합의 조합을 나타낸다. 보 웨브를 용접한 시험체는 모두 특별연성모멘트골조에 필요한 4% 층간변위각 이상의 접합부 회전능력을 발휘하고 있음을 알 수 있다. 그러나 보 웨브를 볼트접

합한 시험체 DB700-SB 및 DB700-MB는 각각 2% 및 3% 층간변위 레벨에서 그림 3과 같은 스캘립(용접접근공, weld access hole)을 가로 지르는 모재의 조기 취성파단이 발생하였다.

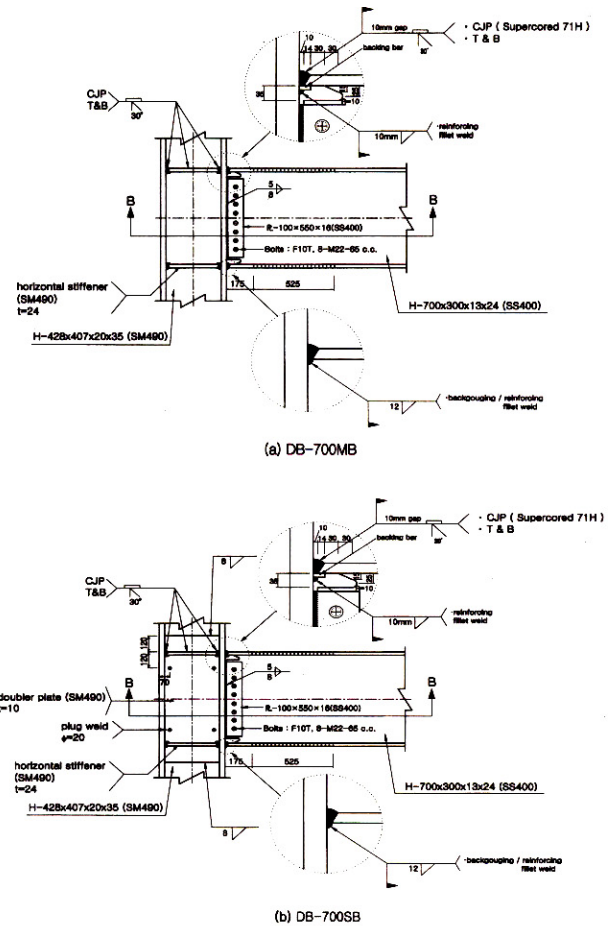


그림 1. 보 웨브를 볼트접합한 시험체

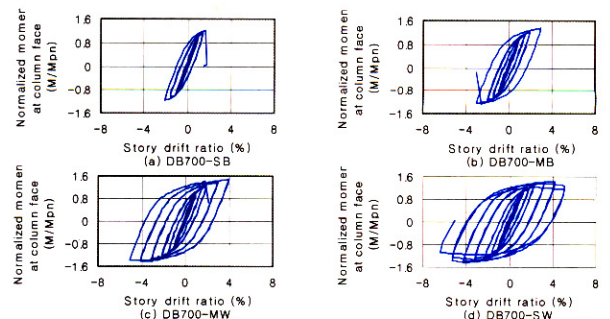
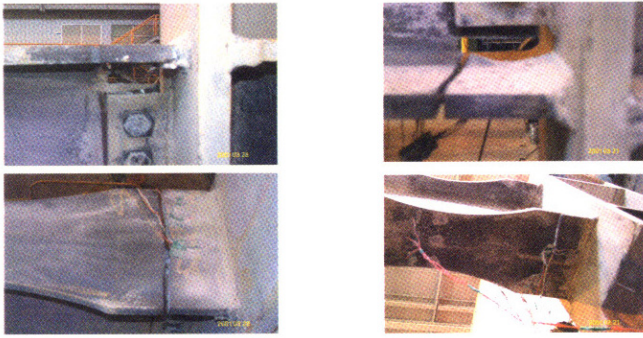


그림 2. 접합부의 회전능력 비교:
(a)-(b); 볼트접합. (c)-(d); 용접접합



(a) DB700-MB (b) DB700-SB
 그림 3. 볼트접합 시험체의 초기 취성파단 모드

그림 4는 보 웨브를 볼트 접합한 시험체 DB700-SB에 파단이 발생했을 때를 기준으로 보 웨브를 용접한 시험체 DB700-SW의 휨변형도와 비교한 것이다. 같은 크기의 접합부 회전각에 대해서, 보 웨브를 볼트로서 접합한 시험체의 휨변형도의 크기가 월등히 (용접한 접합부의 2배 정도) 큼을 알 수 있다. 시험체 DB700-SB와 DB700-SW의 차이는 보 웨브를 볼팅한 것과 용접한 것의 차이만 있다. 따라서 이 실험 결과는 보 웨브를 일반적으로 인정되는 설계관행에 따라 "slip-critical"하게 설계했음에도 불구하고, 설계의도와는 달리 보 웨브에서 슬립이 발생하고 있음을 시사한다. 보 웨브에서의 접합 볼트의 슬립현상은 이전에 수행된 보 웨브 볼트접합 시험체에서도 계속 관측되었다(Krawinkler-Popov 1982; Tsai-Popov 1988; Ricles 등 2002). Tsai-Popov에 의해 수행된 실험에 따르면, 보 웨브 볼트의 슬립을 다소간 방지한 접합법을 사용한 시험체의 성능이 웨브 볼트의 슬립이 발생한 시험체 보다 우월한 것으로 나타났다. 따라서, 웨브 볼트의 슬립은 결과적으로 보 플랜지의 부담으로 전가되어 보 플랜지 취성파단 가능성을 높이는 방향으로 작용할 것이다. Krawinkler 등은 웨브 볼트의 설계시, 최대 전단력 뿐 아니라, 보 웨브에 전달되는 모멘트까지 고려할 필요가 있다고 제안하였다.

그림 5는 패널존과 기둥 플랜지 부근에서 계측된 전단 변형도의 응답을 나타낸 것이다. 스트레인 로제트 R1과 R3에서 계측된 전단변형도의 부호는 서로 일치하고 있다. 접합부의 응력전달 메커니즘이 초등휨이론을 따른다면 이 양자의 부호는 서로 반대가 되어야 하고 보의 중앙부 부근에서 웨브의 전단 응력이 최대가 되어야 한다. 그러나 계측된 스트레인 데이터는 전단력의 전달이 최대가 되어야 하는 보의 중립축 부근이 전단력의 전달이 매우 무력할 뿐만 아니라 심지어 전단력의 역전현상이 발생하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 거동은 Goel 등에 의한 해석적 연구결과와도 상통하는 것이다(Goel 등 1997). 이러한 전단력의 역전 현상은 바람직하지 않다.

왜냐하면 수직방향의 힘의 평형조건을 만족시키기 위해 보 플랜지에 가까운 부분에서 전단응력의 증가가 수반되어야 하기 때문이다. 이는 보 플랜지에 예기치 않은 부담으로 작용하여 보 플랜지를 과응력에 이르게 할 것이다.

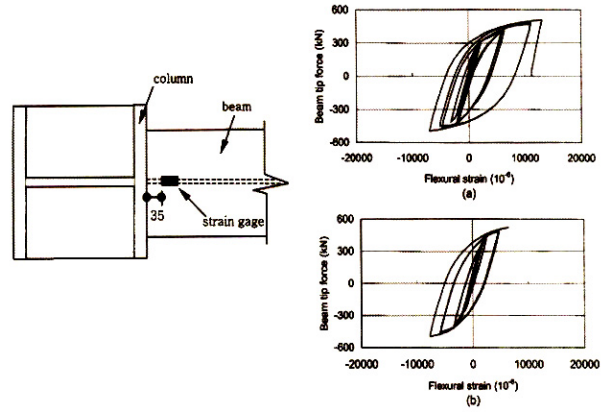


그림 4. 휨변형도 응답비교

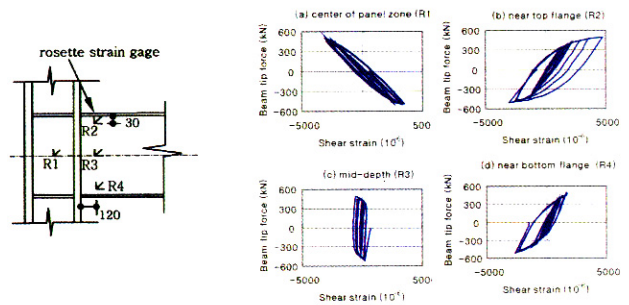


그림 5. 시험체 DB700-SB에서 계측된 전단변형도 응답

따라서, 웨브를 볼트로 접합한 시험체가 초기 취성 파단이 발생하는 원인은 적어도 부분적으로는 웨브 볼트의 슬립과 설계과정에서의 가정과는 다른 응력전달 메커니즘 때문인 보인다. 초등휨이론을 적용하여 보 웨브를 설계하는 현재의 설계 관행은 재고의 여지가 있다.

3. 수치해석에 의한 응력전달 메커니즘 검토

RBS 접합부의 응력전달 메커니즘에 대한 이해를 높이기 위해 시험체 DB700-MB를 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS (HKS 2001)를 사용하여 해석을 수행했다. 시험체의 보-기둥 접합부를 ABAQUS의 8절점 고체요소(C3D8I)를 사용하여 시험체의 테스트 셋업과 동일한 3차원 유한요소 모델을 구성한 후, 예상 최대 보전단력을 시물레이션하는 499 kN의 집중하중을 보 단부에 가했다. 전단탭(shear

tap)의 두께와 형태, 스캘럽의 길이를 다양화 하여, 응력전달 메카니즘과 스캘럽 근처의 보 플랜지의 전단응력도 분포를 고찰하였다. 본 연구에서 검토한 2가지 전단탭 형식을 그림 6에 나타내었다.



(a) conventional (b) modified
그림 6. 본 연구에서 검토한 두가지 전단탭 양식

유한요소 해석을 수행해본 결과 전단탭이 전체 전단력의 50%정도를 전달하는 걸로 나타났다. 즉, 보 전단력의 50% 정도가 보 플랜지를 통해 전달된다는 것인데, 이는 보 웨브가 전단력을 거의 다 전달한다는 초등휨이론의 예상과는 다르다. 이러한 경향은 전단탭의 두께와는 다소 무관했다. 이는 전단탭의 두께 증가로 인한, 보 웨브와 전단탭간의 편심의 증가로 인해, 전단력 전달의 효율이 떨어지기 때문인 것으로 보인다. 그림 7은 유한요소해석에서 얻어진 응력전달경로를 주응력벡터로서 나타낸 것이다. 실험에서 확인된 것과 부합되게, 초등휨이론에 의한 기대와는 달리 보 웨브의 중앙부는 전단력의 전달에 매우 무기력하거나 전단력의 역전현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 보 웨브의 중앙부분을 통하여 전달되는 전단응력이 거의 없으므로 이 부분은 기둥 플랜지와 접합되지 않아도 접합부 내진성능에 미치는 불리한 영향은 거의 없을 것으로 생각된다.

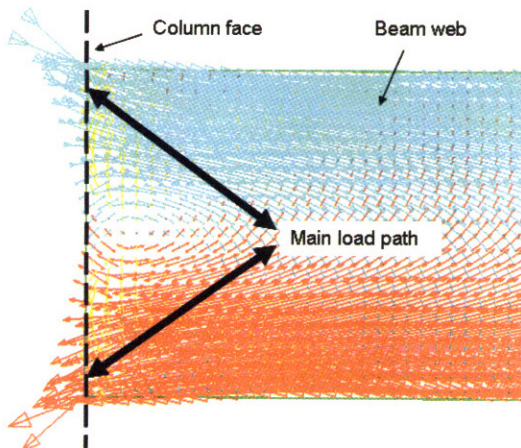


그림 7. RBS 접합부 부근의 주응력 분포

시험체의 취성파단은 스캘럽 부근에서 시작하는 경향을 보인다. 스캘럽에서 취성파단이 시작되는 원인 가운데 하나는 이 부분이 응력집중은 최대인 반면 모재의 샤르피 V 노치 인성값이 최소인 위치라는 점을 들 수 있다. 따라서 스캘럽 부근의 응력집중을 줄이는 것은 접합부의 조기 취성파단의 방지와 관련하여 핵심적 설계고려사항이 되어야 한다. 스캘럽 주변의 응력집중을 최소화하기 위해 그림 8 (b)와 같이 기존 시험체의 스캘럽 형상보다 완만한 구배를 스캘럽을 채용하여 해석을 시도하였다. 그림 9에서와 같이 완만한 형상의 스캘럽을 채용했을 때 최대 전단응력도의 크기가 약 20%정도 감소된 것으로 나타났다.

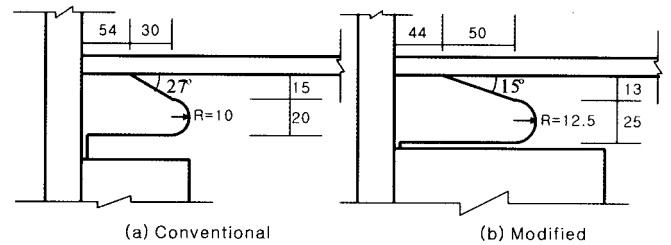
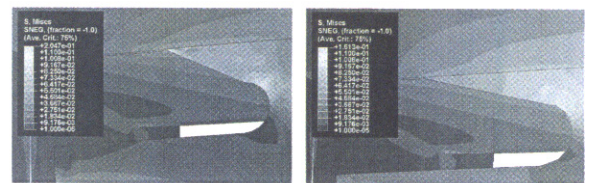


그림 8. 스캘럽의 형상 비교



(a) Conventional (b) Modified

그림 9. 스캘럽 형상에 따른 Von-Mises 응력분포

일반적인 조건하에서 보 웨브가 전달하는 전단력은 전체 전단력의 대략 50% 정도이고 보 웨브를 통해 전달되는 모멘트는 전체의 10% 정도라 할 수 있다.

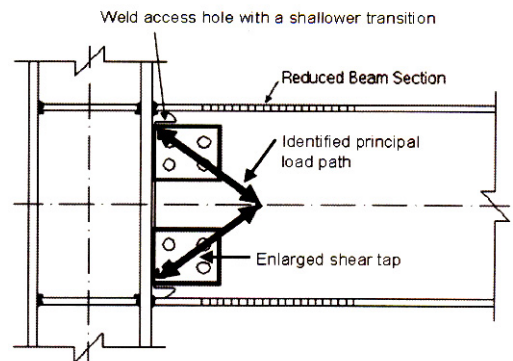


그림 10. 실험과 해석결과를 바탕으로한 보웨브 접합 상세안

이상의 실험 및 해석 결과는 그림 10에 요약된 개선방향을 시사한다. 즉, i) 접합요소는 최대한 실제 응력전달 경로 상에 배치하여 편심을 최소화하고 응력전달에 거의 기여하지 않는 보 웨브의 중심부분은 접합치 않는다, ii) 그림 8(b)와 같이 완만한 구배의 스캘럽을 도입하여 스캘럽 부근의 응력집중을 최소화한다, iii) 약간 크고 두꺼운 전단탭을 사용하여 모멘트 전달을 위한 이차적인 응력전달 경로를 제공함으로써 보 플랜지에 가해지는 부담을 완화시킨다.

4. 보 웨브 볼트접합부 설계법의 제안

본 장에서는 이상의 논의를 토대로 다음과 같은 보 웨브 볼트접합부의 단계적 설계법을 제안하고자 한다.

4.1 보 설계전단력의 산정

그림 11과 같은 지진하중에 의한 모멘트 프로필을 기반으로 보의 설계전단력은 식(1)과 식(2)를 통해 산출한다.

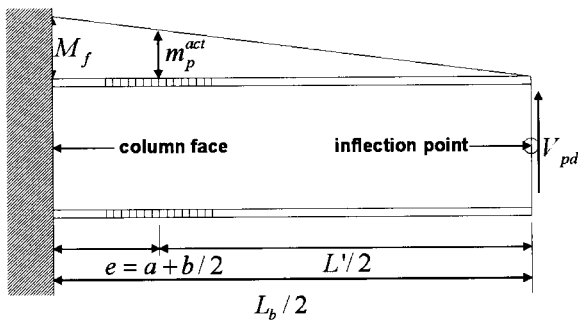


그림 11. 보 스패너의 휨모멘트 프로파일

$$m_p^{act} = \alpha \times Z_{RBS} \times F_{ye} \quad (1)$$

$$V_{pd} = \frac{m_p^{act}}{(L'/2)} \quad (2)$$

단 위 식에서 m_p^{act} = RBS 소성힌지가 변형경화 상태에 도달했을때의 휨 모멘트의 크기, Z_{RBS} = RBS 중심부에서의 소성단면계수, F_{ye} = 강재의 실제 예상항복응력도를 나타낸다. 이철호 등이 수행한 실험결과에 의할 때 SS400 압연H형 강 보의 α 값은 1.25 정도로 얻어졌다(이철호 등 2002).

4.1.1 전단탭에 작용하는 전단과 수직응력의 산정

그림 11은 전단탭과 기둥 플랜지 접합면에서 작용하는 전단(V) 및 수직응력(H)을 나타낸 것이다. 각각의 힘의 크기는

식(3)~식(6)을 통해 산정할 수 있다. 유한요소해석 결과에 의할 때 식(3)~식(6)은 실무적으로 충분한 정확도를 갖는 것으로 확인되었다.

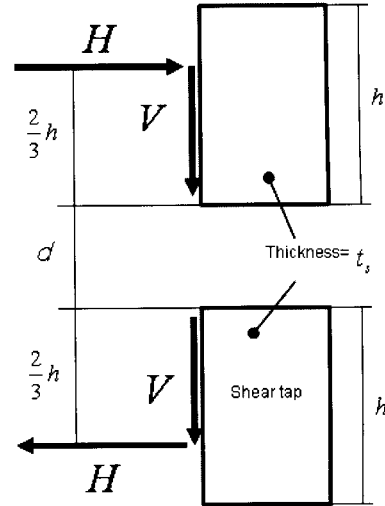


그림 12. 전단탭에 작용하는 수평 및 수직응력

$$V \approx \frac{1}{4} V_{pd} \quad (3)$$

$$M_f = V_{pd} \times (L_b/2) \quad (4)$$

$$M_w \approx \left(\frac{I_w}{I_w + I_f} \right) \times M_f \quad (5)$$

$$H \approx M_w / \left(\frac{4}{3} h + d \right) \quad (6)$$

단, 위식에서 I_f = 보 플랜지만의 의 단면2차모멘트, I_w = 전단탭의 단면 2차 모멘트, M_f = RBS가 변형경화소성모멘트에 도달시 접합부에 작용하는 총모멘트, M_w = 전단탭을 통해 전달되는 모멘트.

4.1.2 전단탭 두께의 산정

전단탭의 두께는 다음의 Von Mises 항복조건을 만족해야 한다.

$$\sigma^2 + 3\tau^2 = \left(\frac{H}{t_s h} \right)^2 + 3 \left(\frac{V}{t_s h} \right)^2 \leq (\phi F_y)^2 \quad (7)$$

$$t_s \geq \sqrt{\frac{\left(\frac{H}{h} \right)^2 + 3 \left(\frac{V}{h} \right)^2}{\phi F_y}} \quad \phi = 0.9 \quad (8)$$

4.1.3 보 웨브 볼트의 설계

보 웨브 볼트에는 수평과 수직방향으로 편심력이 작용한다. 본 접합부는 용접과 마찰볼트접합을 병용한 경우에 해당한다. 따라서 용접된 보 플랜지와 보 웨브 접합부가 공동으로 하중을 효과적으로 전달하기 위해서는 웨브의 볼트접합부에 슬립이 발생치 않도록 하는 것이 매우 중요하다. 따라서 웨브의 볼트접합부는 예상 최대하중에 대해서 슬립이 발생하지 않도록 설계되어야 한다. 이미 계산된 H 및 V, 그리고 적절히 선정된 볼트배열을 전제로 초등역학을 적용하면 볼트에 작용하는 가장 큰 전단력(F_{max})을 쉽게 계산할 수 있다 (그림 13 참조). 즉 F_{max} 는 슬립한계장도(F_{slip}) 보다 작아야 한다 (아래의 식 (9) 참조).

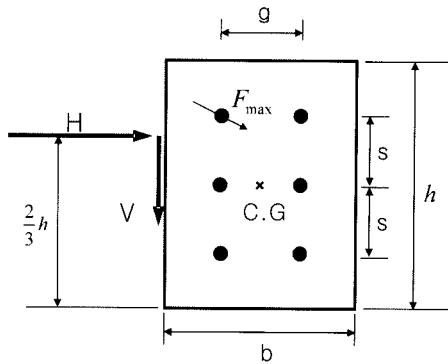


그림 13. 전단탭의 자유물체도

$$F_{max} = \sqrt{\left(\frac{H}{n} + F_x\right)^2 + \left(\frac{V}{n} + F_y\right)^2} < F_{slip} = \mu N \quad (9)$$

단, 위 식에서 n= 볼트의 개수, F_x , F_y = 볼트에 작용하는 편심모멘트에 의한 최대 수평 및 수직성분, μ = 마찰계수, N= 설계볼트 장력.

본 연구에서 제시한 설계법을 타당성을 검증하기 위해 파일럿 테스트 시험체를 설계하였다(그림 14 참조). 경간거리 $L_b = 7200$ mm, 보의 예상항복강도 $F_{ye} = 313$ MPa (SS400), 변형경화계수 $\alpha = 1.25$ 로 가정하여 설계를 수행하였다. 소요 전단탭은 두께는 16mm (SM490)로 선정되었다. 보 웨브와 전단탭의 접합면에 슛 블라스트 표면처리를 전제로 마찰계수를 0.40으로 가정하였다. (9)식의 조건을 만족시키기 위해서 고장력 볼트 F10T-M27 12개가 요구되었다. 이는 예상 최대 보전단력을 기준으로 슬립방지를 위한 볼트개수를 산정하는 전통적 설계법에 의한 요구치 보다 훨씬 많은 것이다. 기존의 설계법으로 설계했을 경우 필요한 볼트의 개수는 고장력 볼트F10T-M22가 8개만 필요했었다 (그림 1 참조).

3장에서 논의한 바와 같이 좀더 완만한 구배의 스캘러를 도입하여 응력집중을 완화시키고자 하였다. 다음장에서 ABAQUS 모델링을 통해 웨브 볼트의 슬립정도를 비교하였으며, 6장에서 본 시험체에 대한 실물대 실험결과를 정리하였다.

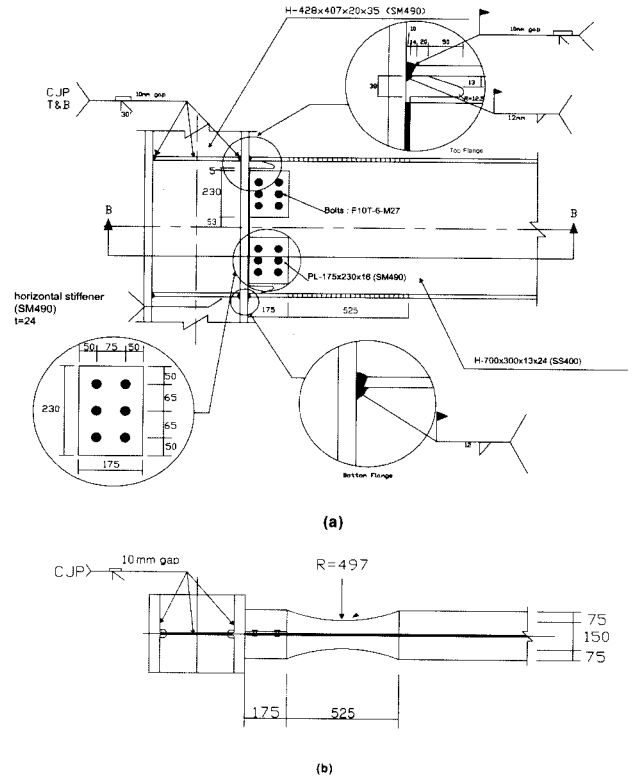


그림 14. 파일럿 시험체 테스트 접합 상세

5. 웨브 볼트의 슬립 해석

본 연구에서 제안된 설계방법이 의도한 “slip-critical condition”을 만족하는지를 해석적으로 검토해 보았다. ABAQUS의 8절점 고체요소(C3D8I)를 사용하여 기존의 설계법에 의한 보 웨브 접합부(그림 1) 그리고 본 연구에서 제시한 접합부(그림 14)를 대상으로 ABAQUS해석을 수행하였다. 전단탭과 보 웨브 사이의 접촉면은 쿨롱마찰모델 (Coulomb friction model)을 채용하되 수치해석상의 수렴 문제를 우회하기 위해 요소크기의 0.0015%의 미소슬립을 허용하였다. 그림 15와 같이 설계볼트장력은 실제 볼트의 위치에 전단탭의 전면과 보웨브 배면에 한쌍의 압축력을 가하여 간단히 모델링하였다. 예상 최대 보전단력에 해당하는 499 kN의 힘을 보 단부에 가하여 응답을 구하였다.

6. 파일럿 테스트 결과

접합부의 내진성능평가를 위한 실험은 SAC (2000)의 다단계 지진하중 프로토콜에 따라 의사정적실험에 의해 진행되었다. 그림 17 테스트 셋업의 전경을 보여준다. 본 논문에서는 지면의 제한으로 전체적 실험결과를 간략하게 보고하고자 한다. 특별연성모멘트골조의 접합부로서 인정되기 위해서는 4% 층간변위수준을 적어도 1사이클 저항할 수 있어야 하고 동시에 강도저하가 원단면의 공칭소성모멘트의 80%이하로 발생해서는 안된다. 그림 18은 파일럿 시험체의 접합부에서 얻어진 이력곡선을 도시한 것이다. 5%의 층간변위 수준에 이르기 까지 접합부 취성파단 없이 공칭소성모멘트의 130% 수준의 강도를 유지하며 매우 안정적인 이력거동을 보여주고 있음을 알 수 있다. 패널존에서 발생한 소성 회전각은 약 0.007 radian 이었으며, 전체 에너지의 25%정도가 패널존에서 소산되었다. 특별연성모멘트골조의 접합부에 요구되는 내진성능 이상을 충분히 만족시키고 있다. 5% 층간변위 이상의 가력을 계속할 수도 있었으나 이미 성능이 충분히 확인되었고 횡지 테스트 셋업의 손상을 우려하여 가력을 종료하였다.

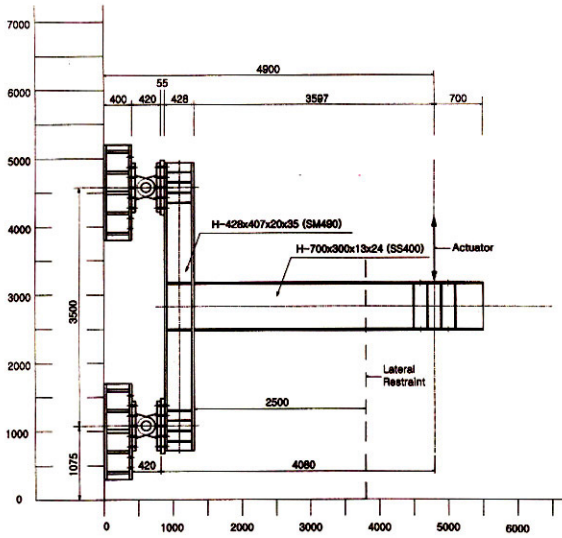


그림 15. 시험체 테스트 셋업

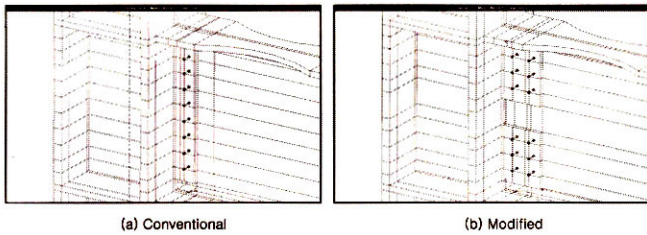


그림 16. 보 웨브 볼트의 프리텐션 모델링

그림 16은 두가지 모델의 해석결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 기존의 설계법에 의한 보 웨브 볼트접합부는 가동과는 달리 웨브 볼트에 슬립현상이 조기에 발생했다. 반면에 본 연구에서 제시된 설계법에 의한 접합부는 슬립이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

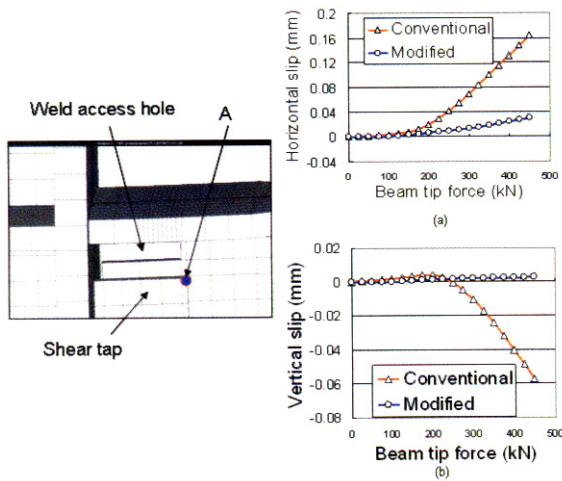


그림 17. 전단탭의 우상단점(A)에서의 슬립응답 비교
(a)수평방향 슬립. (b) 수직방향 슬립

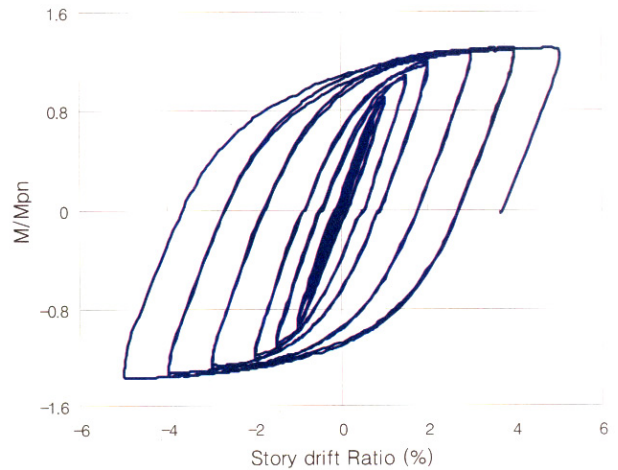


그림 18. 파일럿 시험체 접합부의 이력곡선

7. 결론

웨브를 볼트로 접합한 RBS 철골모멘트 접합부의 내진설계에 관한 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구의 실험 및 해석결과에 의할 때 RBS 접합부에서 발생하는 응력전달 메카니즘은 일반적으로 접합부 설계에서 많이 가정하는 초등휨이론에 의한 거동과는

상당히 다른 것으로 확인되었다. 유한요소해석에 의한 시뮬레이션 결과 역시 기존의 웹 볼트 설계법으로는 전단탱의 미끄럼방지 조건을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다.

- (2) 실험과 해석결과에 통해서 밝혀진 실제 응력전달 경로에 기반을 둔 새로운 보 웹 설계법을 제안하였다. 본 연구에서 제시한 설계법에 의한 웹 볼트의 요구치는, 단순히 예상 최대 보전단력을 기준으로 웹 볼트를 산정하는 전통적 설계법에 의한 것 보다 훨씬 크다.
- (3) 본 연구에서 제시한 설계법에 의해 제작된 실험대 파일럿 시험체의 접합부는 5% 층간변위각에 이르도록 취성 파단 없이 매우 뛰어난 반복적 소성회전능력을 발휘하였다. 이는 본 연구의 방안이 전반적으로 타당함을 입증하는 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국 지진공학연구센터의 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다 (과제번호: R11-1997-045-11004-0).

참 고 문 헌

이철호 등(2002), 고성능 내진 용접 철골모멘트 접합부 개발 및 설계지침 작성, 공동연구보고서, 포항산업과학원/현대건설 기술연구소.

Chen, S. J., Yeh, C. H., and Chu, J. M. (1996). Ductile steel beam-to-column connections for seismic resistance, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 122(11), pp. 1292-1299

Chi, B. and Uang, C.-M. (2002). Cyclic Response and Design Recommendations of Reduced Beam Section Moment Connections with Deep Column, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 128(4), pp. 464-473

Engelhardt, M. D., Winneberger, T., Zekany, A. J., Potyraj, T. J., (1998). Experimental Investigations of Dogbone Moment Connections, *Engrg. J.*, 35(4), AISC, Fourth Quarter, pp. 128-139

Gilton, C. S. and Uang, C.-M. (2002). Cyclic Response and Design Recommendations of Weak-Axis Reduced Beam Section Moment Connections, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 128(4), pp. 452-463

Goel, S. C., Stojadinovic, B., and Lee, H.-K. (1997). Truss analogy for steel moment connections, *Eng.*

J. 34(2), pp. 43-53

HKS (2001) ABAQUS User's Manual, Version 6.2 Hibbit, Karlson & Sorenson, Inc., Pawtucket, Rhode Island.

Iwankiw, N. (1997). Ultimate strength consideration for seismic design of the reduced beam section (internal plastic hinge), *Engrg. J.* 34(1), pp. 3-16

Jones, Sl. L., Fry, G. T., and Engelhardt, M. D., (2002). Experimental Evaluation of Cyclically Loaded Reduced Beam Section Moment Connections, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 128(4), pp. 441-451

Krawinkler, H. and Popov, E. P. (1982). Seismic Behavior of Moment Connections and Joints, *J. Struct. Division.*, ASCE, 108(2), pp. 373-391

Lee, C.-H., Jeon, S.-W., Kim, J.-H., Kim, J.-H., and Uang, C.-M. (2004). Seismic Performance of Reduced Beam Section Steel Moment Connections: Effects on Panel Zone Strength and Beam Web Connection Method, *Proc., 13th World Conf. of Earthquake Engrg.*, Paper No. 3449, Vancouver, B.C., Canada

Lee, C.-H., Kim, J.-H., (2004). Seismic Design of Reduced Beam Section Steel Moment Connections with Bolted Web Attachment, *Proc. of SEEBUS 2004*, pp. 259-268, Taiwan

Lee, C.-H., Jeon, S.-W., Kim, J.-H., Uang, C.-M. (2005). Effects of Panel Zone Strength and Beam Web connection Method on Seismic Performance of Reduced Beam Section Steel Moment Connections, 2005 December issue of *J. Struct Engrg.*, ASCE, (in-press)

Plumier, A. (1997). The dogbone: back to the future, *Engrg. J.* 34(2), pp. 61-67

Ricles, J. M., Mao, C., Lu, L. W., and Fisher, J. W. (2002). Inelastic Cycle Testing of Welded Unreinforced Moment Connections, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 128(4), pp. 429-440

SAC (2000). Seismic design criteria for new moment-resisting steel frame construction, Report No. FEMA 350, SAC Joint Ventrue, Sacramento, Calif.

Tsai, K. C., and Popov, E. P. (1988). Steel beam-column joints in seismic moment resisting frames, Rep. No. UCB/EEERC-88/190, Earthquake Engrg.

Res. Ctr., University of California, Berkeley, Calif.
Zekioglu, A., Mozaffarian, H., Chang, K. L., and Uang,
C.-M. (1997). "Designing after Northridge," Modern

Steel Constr., 37(3), pp. 36-42
(접수일자 : 2005. 8. 12 / 심사일 2005. 9. 2 /
심사완료일 2005. 10. 26)