

보 플랜지 절취형 (독본) 내진 철골모멘트 접합부의 응력전달 메카니즘
재평가

Re-evaluation of Force Transfer Mechanism of Reduced Beam Section
(Dogbone) Seismic Steel Moment Connections

이철호* 김재훈**
Lee Cheol Ho , Kim Jae Hoon

Abstract

Employing classical beam theory for the design of RBS seismic steel moment connections was brought into question in this study. Both the experimental strain data and analytical results from the calibrated finite element analysis confirmed that the shear transfer mechanism in the RBS connection is completely different from that as predicted by classical beam theory. Plausible explanations of a higher incidence of brittle fractures observed in the specimens with bolted-webs were presented. It was pointed out that the practice of providing web bolts uniformly along the beam depth is not consistent with the load path identified by both experimental and analytical results. More rational bolted-web details were proposed based on the identified principal load path.

1. 서론

1994년 미국의 노스리지 및 1995년 일본의 고베 지진이후 다양한 종류의 고연성 접합상세가 제시되어 왔다 (SAC 2000). 이 가운데 RBS (Reduced Beam Section, Dogbone) 접합부는 여러 연구자에 의해 수행된 실물대 실험을 통하여 뛰어난 연성능력이 계속적으로 입증되었으며 가장 대표적인 저비용/고연성 내진상세로 자리매김하고 있다 (참고문헌 1~7, 11). 성공적 결과를 보여준 시험체의 대부분은 보 플랜지 및 보 웨브를 모두 그루브 용접한 경우이다. 보 웨브를 볼트로서 기둥 플랜지와 접합하면 접합비용을 더욱 절감할 수 있으므로 최근에 국내외에서 보 웨브를 볼트 접합한 실험연구가 진행된 바가 있다 (이철호 등 2001; 2002; 2003, Jones 등 2002). 그러나 보 웨브와 플랜지를 모두 용접한 시험체에 비해 월등히 높은 빈도의 접합부 취성과파괴가 보 웨브를 볼트로 접합한 시험체에서 발생하였다. 그러나 현재까지 그 이유가 설득력있게 제시되지 않고 있다. 본 연구에서는 우선 초등휨이론에 기초한 현행의 보 웨브 접합부 설계법에 문제가 있음을 지적하고, RBS 접합부의 실제 응력전달경로에 부합되는 새로운 보 웨브 볼트접합 설계방안을 제시하고자 한다.

* 정회원, 서울대학교 건축학과 부교수

** 정회원, 서울대학교 건축학과 박사과정

2. 기존 실험결과와 고찰

그림 1~2는 본 연구자가 최근에 수행한 3RBS 접합부 실물대 시험체의 접합상세를 보여주고 있다 (이철호 등 2002; 2003). 표준 연단거리 및 피치를 고려하여 고장력 볼트 F10T-M22를 충분히 (8개) 배치하고 검력 토크렌치로서 소정의 볼트장력을 도입하였다. 이는 RBS가 변형경화에 도달했을 때 예상되는 보 전단력을 슬립없이 전달할 수 있는 볼트 개수이다. 볼트의 과단강도 및 보 웨브의 지압강도는 보 전단력의 2배 이상이다. 그림 3은 본 실험에 사용된 T자형 실물대 시험체의 전형적 테스트 셋업을 보여준다. 반복하중의 가력은 SAC(2000)의 표준반복하중 가력프로그램을 사용하였다. 실험과 관련한 좀더 구체적인 사항은 필자의 선행연구를 참조하기 바란다.

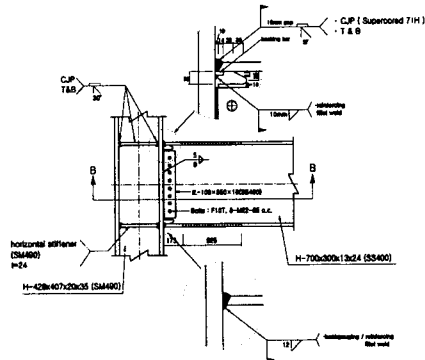


그림 1 보 웨브를 볼트접합한 균형 패널존 시험체 (DB700-MB) 상세

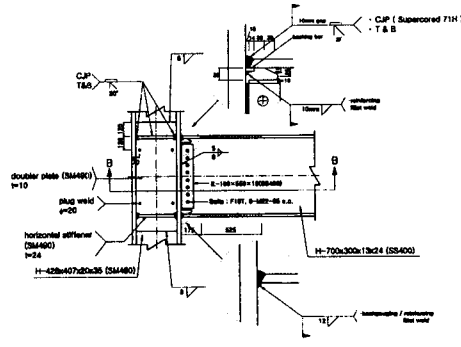


그림 2 보 웨브를 볼트접합한 강한 패널존 시험체 (DB700-SB) 상세

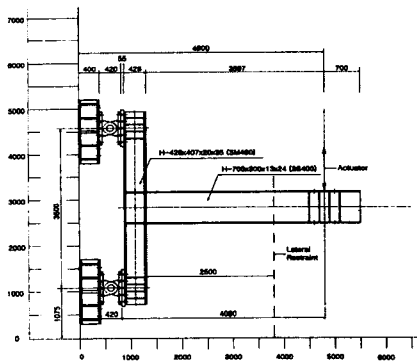


그림 3 테스트 셋업

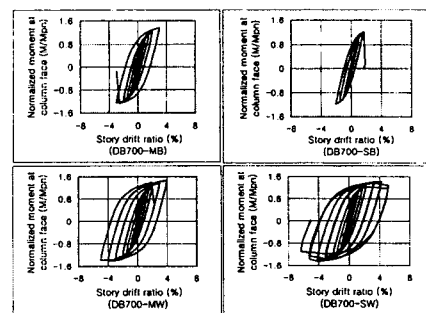


그림 4 이력곡선 비교 (보 웨브 볼팅 대 용접)

그림 4는 보 웨브를 용접한 2개의 시험체 (DB700-MW 및 DB700-SW)를 포함한 4개 시험체의 내진성능을 보여주는 이력곡선이다. 그림 4에서 각 시험체의 명칭은 DB700-SW: 강한 패널존과 보 웨브 용접, DB700-SB: 강한 패널존과 보 웨브 볼팅, DB700-MW: 균형 패널존과 보 웨브 용접, DB700-MB: 균형 패널존과 보 웨브 볼팅의 조합을 나타낸다. 보 웨브를 용접한 DB700-SW 및 DB700-MW 시험체는 모두 특별연성모멘트골조에 필요한 내진성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다. 4개의 시험체 모두에서 보-기둥 그루브 용접부 자체는 양질로 시공되어 취성파괴의 문제가 발생하지 않은 것으로 나타났다. 그러나 보 웨브를 볼팅한 시험체 DB700-SB 및 DB700-MB는 각각 2% 및 3% 층간변위 레벨에서 용접접근구멍을 가로 지르는 모재의 취성파괴가 발생하였다(그림 5 및 6 참조). 즉 보-기둥 그루브 용접부를 양질로서 시공하면 그루브 용접부 자체의 과단은 거의 발생하지 않는다. 이 부분의 문제가 해결되었을 때, 취성파괴 발생의 문제는 스킵 내의 보

플랜지(모재)로 옮겨지는 경향이 관측되었다. 이 실험결과는 RBS를 도입해도 보 웨브를 볼팅한 경우는 용접접근구멍을 가로 지르는 모재의 조기 취성파단으로 인해 내진성능이 크게 향상되지 않음을 보여 준다.

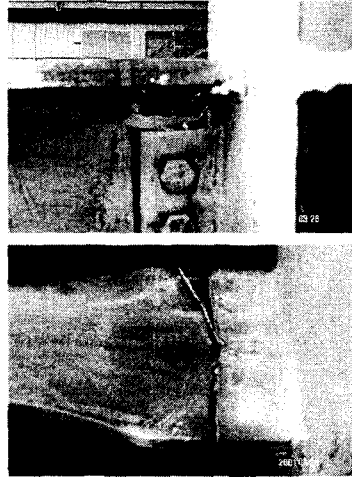


그림 5 시험체 DB700-MB의 조기 취성파단 모드



그림 6 시험체 DB700-SB의 조기 취성파단 모드

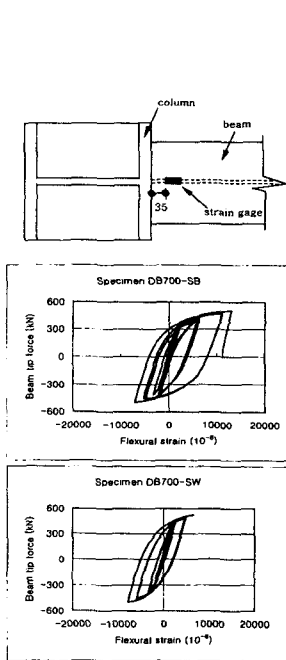


그림 7 시험체 DB700-SB 파단시의 휨변형도 비교

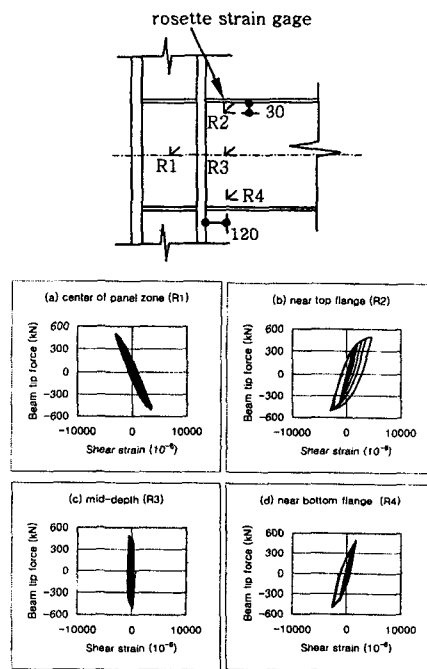


그림 8 시험체 DB700-SB에서 계측된 전단변형도 응답

그림 7은 보 웨브를 볼트 접합한 시험체 DB700-SB에 파단이 발생했을 때를 기준으로 보 웨브를 용접한 시험체(DB700-SW)의 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 관측결과는, 보 웨브를 일반적 표준설계관행에 따라 "slip-critical"하게 설계했음에도 불구하고, 설계의도와는 달리 보 웨브에서 슬립이 발생하고 있음을 시사한다. 이 슬립은 결과적으로 보 플랜지의 부담으로 전가되어 보 플랜지 취성과파단 가능성을 높이는 방향으로 작용할 것이다.

그림 8은 패널존과 기둥 플랜지 부근에서 예측된 전단 변형도의 응답을 나타낸 것이다. 만일 접합부의 응력전달 메카니즘이 초등휨이론을 따른다면 패널존의 전단응력과 보 웨브의 전단응력은 서로 다른 부호를 갖어야 한다. 그러나 이러한 예상과는 달리 스트레인 로젯 R1과 R3에서 예측된 전단변형도의 부호는 서로 일치하고 있다. 즉 초등휨이론에 의할 때 전단력의 전달이 최대가 되어야 하는 보의 중립축 부근에서 전단력의 전달에 매우 무력할 뿐만 아니라 심지어 역전현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 전단력의 역전현상은 바람직하지 않다. 왜냐하면 힘의 평형조건을 만족시키기 위해 보 플랜지에 가까운 부분에서 전단응력의 증가가 수반되어야 하기 때문이다. 이는 보 플랜지에 예기치 않은 부담으로 작용하여 보 플랜지를 과응력으로 몰아갈 것이기 때문이다. 이와 관련하여서는 다음 절에서 좀더 자세히 논의하기로 한다.

3. 응력전달 메카니즘의 재평가 및 보 웨브 접합 개선방안

일반적으로 철골 모멘트 접합부는 초등 휨이론에 근거하여 설계되어 왔다. 즉 접합부 부근의 전단력은 보의 웨브가 전부를 전달하고 휨모멘트는 보의 플랜지를 통하여 대부분을 전달하는 것으로 가정하여 설계하는 것이 일반적인 관행이다. 그러나 양 지진 이후 주목할만한 연구성과의 하나로써 보-기둥 접합부의 설계에 초등 휨이론을 적용하는 것이 부적절하다는 점이 몇몇 연구자에 의해 제기된 바 있다 (Goel et al. 1997, Lee-Uang 1997; 2001, Lee-Yoon 1999, Lee 2002). 본 연구자는 헌치 및 리브접합부의 응력전달 메카니즘이 초등휨이론과 전혀 다름을 지적하고 새로운 응력전달모형과 이에 근거한 설계법을 제시한 바가 있다. Goel 등은 초등 휨이론 대신 철근 콘크리트분야에서 이미 받아들여지고 있는 유사트러스이론(truss analogy)을 시론적으로 도입하여 철골 모멘트 접합부의 응력전달경로를 새롭게 파악하고 이를 설계에 반영하는 시도를 한 바가 있다. 이하에서는 해석적 결과를 토대로 접합부 응력전달 메카니즘을 재평가하고 이를 기초로 보 웨브 접합법의 개선방안에 관해 논의하고자 한다.

3.1 초등휨 이론에 의한 접합부 설계관행 고찰

일반적으로 평면유지의 가정 (곧 베르누이-오일러의 가정)을 전제로 전개되는 휨이론을 초등 휨이론이라 한다. 이 가정으로부터 강구조물의 설계에 가장 기본이 되는 2개의 응력도 산정공식인 (1)식 및 (2)식, 곧 휨응력도 및 전단응력도 공식을 유도할 수 있다.

$$\sigma = \frac{M}{I} y \quad (1)$$

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (2)$$

그림 1은 (2)식에 의해 계산된 H형강보 웨브에서의 전단응력도 분포패턴을 그린 것이다. 잘 알려진 바와 같이 H형강의 형태는 단면의 휨성능을 최대화하기 위한 결과로 얻어진 것으로 웨브는 전단력을, 플랜지는 휨모멘트를 거의 대부분을 지지하는 "역할분담"이 이루어지는 독특한 단면으로 볼 수 있다.

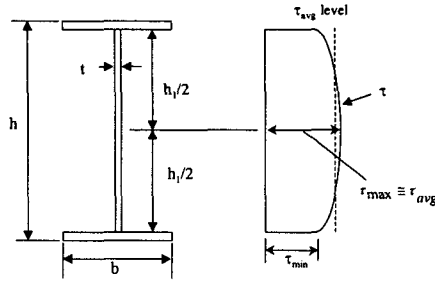


그림 9 H형강 보 웨브의 전단응력도 분포

설계실무에서는 흔히 (2)식에 의해 중립축 부근의3 최대 전단응력도를 정산하는 대신 (3)식을 사용하여 전단력 V를 단순히 웨브의 단면적으로 나눈 값, 곧 웨브의 평균 전단응력도 τ_{avg} 를 사용하는 경우가 많다 (이 경우 최대값과의 오차는 10 % 범위에 있다).

$$\tau_{max} \approx \tau_{avg} = \frac{V}{th_1} \quad (3)$$

(2)식의 전단응력도를 보 웨브 면적에 대하여 적분하여 보면 일반 압연H형강의 경우 웨브에서 90%~98%를 분담하는 것으로 계산된다. 곧 보 플랜지의 분담비율은 10%~2%에 불과하다는 의미이다. 이러한 인식이 보-기둥 접합부의 설계관행에도 그대로 전이된 것으로 추측된다. 즉 모멘트 접합부를 통하여 기둥으로 전달되어야 하는 전단응력은 전적으로 보의 웨브를 통하여 이루어진다고 가정하여 설계하는 것이 보통이다. 그러나 보의 플랜지와 웨브의 응력전달상의 역할분담은 평면유지의 가정이 만족되는 경우에만 타당한 것임을 상기할 필요가 있다. 철골 보-기둥 접합부는 여러 개의 판재가 접합되어 구속되므로 기하학적 불연속성이 매우 크고 응력상태도 복잡한 경계부로서 경계조건효과로 인해 평면유지의 가정이 성립하지 않을 수가 있다. 즉 관행적으로 가정하는 보 웨브와 플랜지 사이의 역할분담이 이루어지지 않을 수 있다. 웨브가 전적으로 전단력을 분담하지 않으면 보 플랜지는 휨응력 외에도 전혀 고려하지 않은 전단력까지 부담하게 되어 보 플랜지가 과도응력 상태에 이를 수 있다. 그림10은 춤 500 mm - 750 mm 사이의 H형강 보로 이루어진 보-기둥 접합부를 3차원 유한요소에 의해 해석한 결과로서, 기둥 외주면으로부터의 거리에 따른 보 웨브 전단응력도의 전형적 분포패턴을 보여주고 있다 (Lee-Yoon 1999). 기둥 플랜지에 근접한 보 웨브의 중립축 부근에서는 전단력의 역전현상이 발생하거나 전단력의 전달에 매우 무력함을 알 수 있다. 이는 그림 8에 나타난 실험결과와 전적으로 일치하는 것이다. 보 춤의 40 % (0.40d)의 지점에 이르러서야 (2)식에 의한 전단응력분포와 유사해짐을 알 수 있다 (그림9 참조). 기둥 플랜지에서 보 춤의 40 % 이내에 속하는 영역은 접합부의 복잡한 경계조건에 영향을 받는 영역으로서 초등 휨이론이 잘 적용되지 않음을 시사한다. (2)식에 의한 전단응력의 예측이 접합부 주변에서 부정확한 이유를 좀더 근본적으로 고찰할 필요가 있다. (2)식은 (1)식을 기초로 유도된다. 즉 보의 특정 지점의 전단응력도는 좌우 휨응력의 차이를 보상하여 평형조건을 만족시키기 위해 발생하는 것으로 볼 수 있다. 또한 (1)식은 평면유지의 가정을 전제로 유도된 것이다. 따라서 평면유지의 가정이 성립하지 않는 지점에서는 (2)식에 의한 전단응력도의 예측이 부정확할 수밖에 없다. 기둥 플랜지에 인접한 보의 단면에서는 평면유지의 가정이 만족되지 않음을 필자의 기존연구에서 이미 지적한 바가 있다 (Lee-Yoon 1999). 요약하자면, 초등휨이론을 적용하여 보 웨브를 설계하는 현재의 설계관행은 재검토될 필요가 있다.

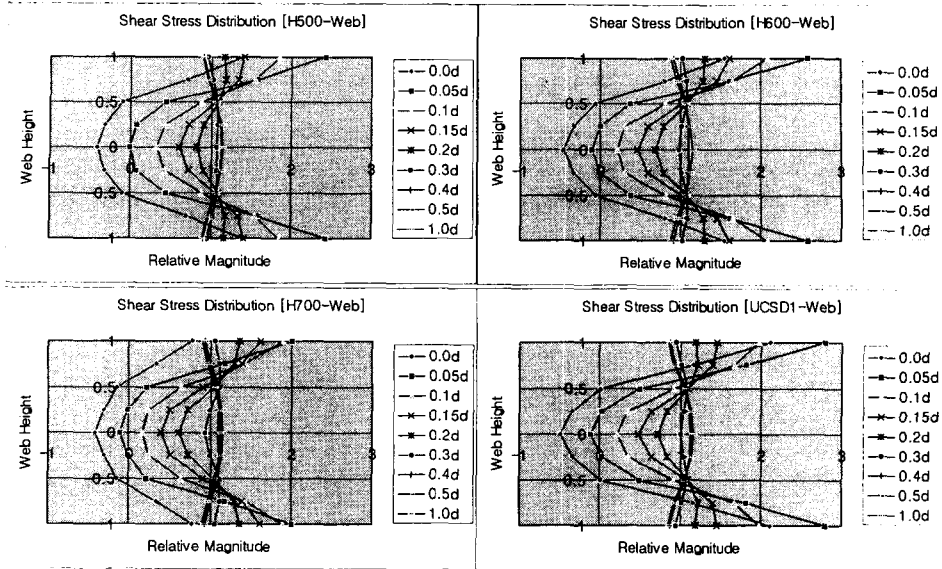


그림 10 기둥 외주면으로부터의 거리에 따른 보 웨브의 전단응력도 분포
(전단응력도의 크기는 (3)식, 즉 웨브의 평균전단응력도 τ_{avg} 로 나눈 상대크기임)

3.2 접합부의 실제 응력전달 경로

RBS 접합부의 응력전달 메카니즘의 규명하기 위해 탄소성 유한요소해석을 수행하기 전에 우선 유한요소모델의 타당성을 가용한 실물대 실험결과와 비교하여 검증하였다. 본 연구자의 최근 실험 자료 가운데 (이철호 등 2002; 2003), 보 H-700X300X13X24 (SS400), 기둥 H-428X407X20X35 (SM490)로 구성된 실물대 시험체 DB700-MW의 시험결과를 사용하였다. 유한요소해석에 사용된 요소는 ABAQUS 8절점 고체요소(C3D8R)로서, 시험체의 테스트 셋업과 동일한 3차원 유한요소모델을 구성한 후, 실험에 사용한 SAC 2000 철판접합부 내진실험용 반복재하 변위제어 프로그램에 따라 폰 미세스 항복조건 및 Riks알고리즘에 의해 반복재하 탄소성해석을 수행하였다. 변형경화 모델은 비선형 등방적/운동학적 모델(nonlinear isotropic/kinematic hardening model)을 사용하였다. 보와 기둥의 플랜지 및 웨브의 항복강도와 인장강도는 실험종료 후 시험체에서 채취한 시편의 인장시험결과를 사용하였다. 그림11은 탄소성 유한요소해석모델이 반복재하 실험결과를 잘 시뮬레이션할 수 있음을 보여주고 있다.

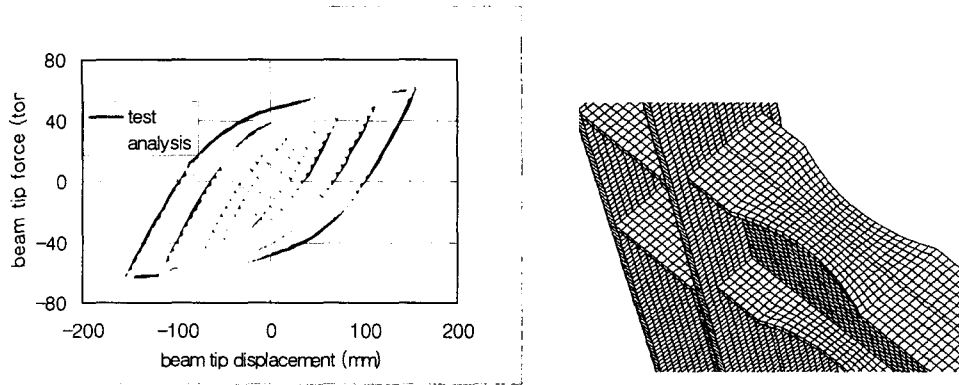


그림 11 실험결과와 비선형 유한요소해석 시뮬레이션 결과와의 정합성 확인
(시험체 DB700-MW)

검증된 유한요소모델을 사용하여 응력전달 메커니즘을 검토하였다. 그림 12 및 13은 본 유한요소 해석의 핵심결과로서 탄소성 영역에서의 응력전달경로를 주응력벡터로서 나타낸 것이다. 실험에서 확인된 것과 부합되게, 초등휨이론에 의한 기대와는 달리 보 웨브의 중앙부는 전단력의 전달에 매우 무기력하거나 전단력의 역전형상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 실제의 응력전달경로는 대각선 방향의 스트럿-타이 모형에 가깝다. 소성역으로 진행되면 전단력의 역전현상이 더욱 심화되며, “응력의 공백지대”는 내부로 침투하는 경향을 보이나 전체적 거동은 탄성거동시와 크게 다르지 않다. 기존의 설계법은 응력의 공백지대 내지는 전단력의 역전지대에 위치한 볼트에서 응력전달이 이루어질 것이라는 잘 못된 가정에 근거하고 있음을 알 수 있다. 이상의 논의를 종합하면 그림 14와 같은 접합상세가 실제 응력전달경로에 부합되는 바람직한 접합상세로 사료된다. 그림 14 상세의 핵심은 1) 전단력의 역전이 생기는 중립축 부근은 접합치 않고 주응력 전달경로상에 접합요소를 집중배치하는 것이다, 2) 또한 “heavy” shear tap을 사용하여 전단력을 보 웨브로 끌어들이 보 플랜지에 부담을 전가하지 않는 것이다 (“heavy” shear tap은 모멘트 전달의 2차경로로서의 역할도 기대된다), 3) 용접접근구멍의 보플랜지를 “free-flange” 스타일로 제작하여 보 플랜지는 모멘트에서 기인하는 응력만을 전달케 한다는 것 등이다. 후속연구에서는 새로운 해석적 전단응력 전달모델을 정립하고, 이를 기초로 전단 탭(shear tab) 및 볼트 설계법을 포함한 접합부 설계법을 제시할 것이다. 이후 실무대 파일럿 시험을 통하여 방안의 타당성을 검증할 것이다.

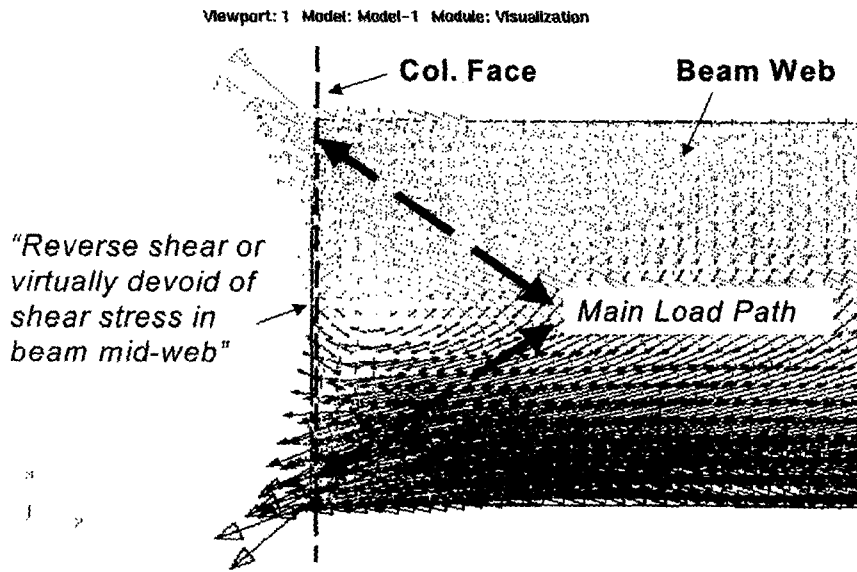


그림 12 RBS 접합부의 부근의 탄성 주응력분포 및 응력전달경로 (층간변위각 0.5 %)

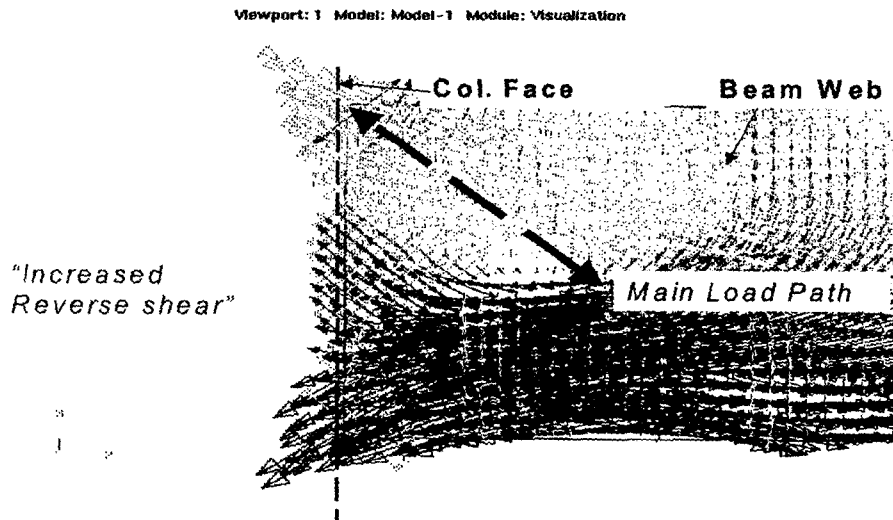


그림 13 RBS 접합부의 부근의 소성 주응력분포 및 응력전달경로 (층간변위각 4 % 수준)

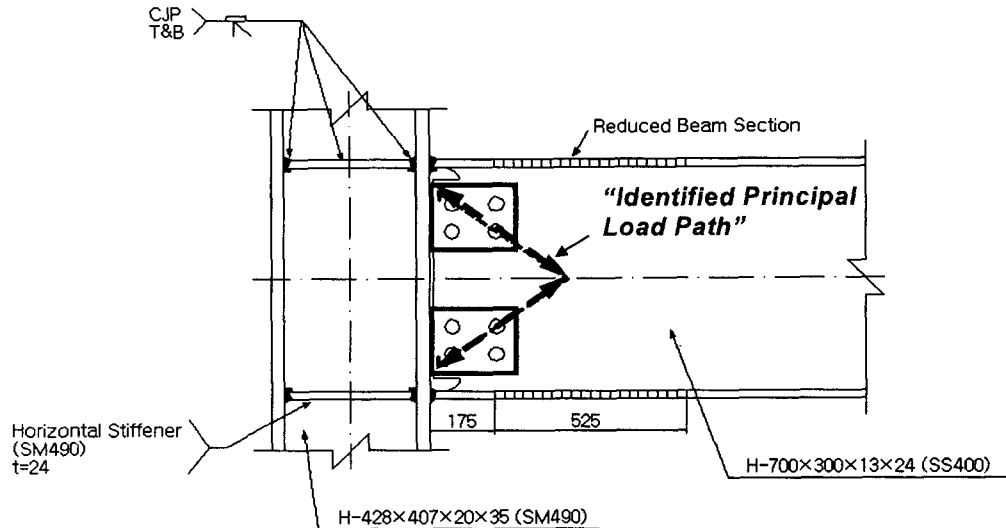


그림 14 실제 응력전달경로에 부합되는 보 웨브 접합상세 (안)

4. 결론

최근의 국내외 실험결과에 의할 때, 보 플랜지의 절삭(RBS, Dogbone)을 통하여 "structural fuse"를 도입하더라도 보 웨브를 볼트로 접합한 접합부는 월등히 높은 빈도의 접합부 조기 취성 파괴가 발생하는 경향이 보인다. 본 연구에서는 우선 초동힘이론에 기초한 현행의 보 웨브 접합부 설계법에 문제가 있음을 실험 및 해석적 자료를 통하여 지적하고, RBS 접합부의 실제 응력전달경로에 부합되는 새로운 보 웨브 볼트접합 설계방안에 관하여 논의하였다. 후속연구를 통하여 새로운 전단응력 전달모형을 정립하고, 이를 기초로 전단 탭(shear tab) 및 볼트 설계법을 포함한 접합부 설계법을 제시할 것이다. 이후 실물대 파일럿 시험을 통하여 방안의 타당성을 검증할 것이다.

감사의 글: 본 연구는 한국지진공학연구센터의 연구비지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다 (과제번호: R11-1997-045-11004-0).

참고문헌

1. 이철호, 전상우, 김진호 (2003). "Cyclic Seismic Performance of Reduced Beam Section Steel Moment Connections: Effect of Panel Zone Strength and Beam Web Connection Type", 한국지진공학회 논문집, 7권 3호, 69-77
2. 이철호, 전상우, 김진호 (2002). "RBS 철골모멘트접합부의 내진거동평가를 위한 반복재하 실물대 실험", 한국강구조학회논문집, 14권 4호, 557-566
3. 이철호 등 (2001). "고성능 내진접합부 상세개발 및 설계지침", 포항산업과학원/현대건설기술연구소
4. 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), 1292-1299.
5. 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), 464-473.
6. 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, 128-139
7. 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), 452-463
8. Goel, S. C., Stojadinovic, B., and Lee, H.-K. (1997). "Truss analogy for steel moment connections." *Eng. J.* 34(2), 43-53.
11. Jones, S. 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), 441-451.
12. Lee, C.-H. (2002). "Seismic Design of Rib-Reinforced Steel Moment Connections Based on Equivalent Strut Model." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 128(9), 1121-1129
13. Lee, C.-H. and Uang, C.-M. (2001). "Analytical Modeling and Seismic Design of Steel Moment Connections with Welded Straight Haunch." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 127(9), 1028-1035.
14. Lee, C.-H. and Uang, C.-M. (1997). "Analytical Modeling of Dual Panel Zone in Haunch Repaired Steel MRFs." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 123(1), 20-29.
15. Lee, C.-H. and Yoon, T.-H. (1999). "Analytical Reexamination of Shear Transfer Mechanism in Welded Steel Moment Connection." Proc. of SEEBUS 1999, Oct. 29, 1999, Seoul, Korea, 119-128
16. SAC (2000). "Seismic Design Criteria for New Moment-Resisting Steel Frame Construction." *Report No. FEMA 350*, SAC Joint Venture, Sacramento, CA.