

웹 개구부를 갖는 철골 보-기둥 접합부의 내진 성능에 관한 연구

Behavior of Reduced Beam Section Connections with Web Openings

박 종 원¹⁾ · 강 승 민²⁾ · 황 인 규³⁾ · 강 태 경⁴⁾ · 권 기 주⁵⁾
Park, Jong Won Kang, Seoung Min Hwang, In Kyu Kang, Tae kyoung Kwon, Ki Ju

요 약 : 보-기둥 접합부의 내진성능을 향상시키기 위해 소성힌지의 발생위치를 보의 내부로 유도한 철골 모멘트 접합부에 대해 실험연구를 수행하였다. 이를 위해 보의 단면을 감소시키는 방안으로는 dogbone 접합부에서 처럼 플랜지를 감소시키는 대신에 웹에 개구부를 설치하였다. 본 연구에서는 개구부의 형상 및 크기를 변수로 하여 총 4개의 실제 크기의 시험체에 대해 반복하중 실험을 수행하였다. 4개 시험체 모두 기둥은 H-458×417×30×50, 보는 H-792×300×14×22를 사용하였다. 실험결과 웹 개구부를 이용한 접합부는 강진지역에서 철골 모멘트 연성골조에 요구되는 0.04 rad.의 총회전각을 발휘할 수 있는 것으로 나타났다.

ABSTRACT : A test program was conducted on seismic-resistant steel moment connections constructed using Reduced Beam Sections with beam web openings. In the connection, in order to enhance ductility capacity under severe cyclic loads, a portion of the beam web near the beam-to-column connection is cut out instead of the beam flange as in dogbone connections. A total of 4 large scale specimens were tested in this program. The specimens were all made using H-458×417×30×50 sections for the columns and H-792×300×14×22 sections for the beams. Test specimens showed excellent performance similar to that of dogbone connections.

핵심용어 : 접합부, 내진성능, 유공보, 감소단면

KEYWORDS : connection, seismic performance, web openings, reduced beam section

1) 정회원, 홍익대학교 건축공학과 조교수
2) 학생회원, 홍익대학교 대학원 석사과정
3) 학생회원, 홍익대학교 대학원 박사과정
4) 한국전력연구원 연구원
5) 한국전력연구원 책임연구원

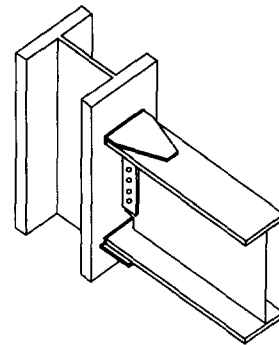
본 논문에 대한 토의를 2001년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

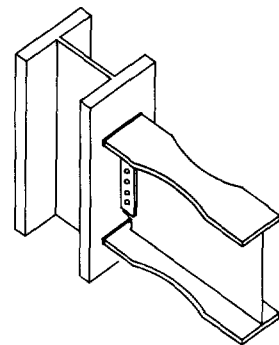
1994년의 노스리지 지진(Northridge Earthquake)과 1995년의 고베 지진(Kobe Earthquake)은 내진성능이 우수하다고 믿어 왔던 철골 보-기둥 접합부에 큰 피해를 입혔다.^{(1),(2)} 연구결과 보 플랜지와 기둥 플랜지의 접합 위치에서 용접 결함, 열영향부의 영향, 그리고 응력집중의 효과 등이 취성파괴(brittle failure)의 원인이 되는 것으로 나타났다. 그 후 접합부의 내진성능을 개선하기 위해 소성힌지의 발생위치를 취성파괴가 발생할 수 있는 보 플랜지와 기둥 플랜지의 접합 위치로부터 보 내부 쪽으로 이동시키는 방안이 연구되어 왔다.

보 플랜지와 기둥 플랜지의 접합 위치를 커버 플레이트, 리브, 또는 헌치 등으로 보강하는 방법(strengthening methods)은 기존의 접합부에 비해 내진성능을 크게 향상시킬 수 있다(그림 1(a)).^{(3)~(7)} 그러나 접합부의 보강은 제작비 상승의 요인이 되며 보강을 위해 사용되는 많은 양의 용접이 새로운 취성파괴의 요인이 될 수 있는 것으로 나타났다. 이에 대한 대안으로 그림 1(b)와 같이 보 플랜지와 기둥 플랜지의 접합으로부터 어느 정도 떨어진 위치에서 보 플랜지의 일부를 도려냄으로써 그 곳에 소성힌지의 발생을 유도하는 방안(weakening methods)에 대한 연구가 수행되었다.^{(8)~(16)} 연구결과 이 방법에 의한 접합부(Dogbone connections 또는 Reduced Beam Section connections이라 함)는 보강하는 방법에 의한 접합부와 유사한 정도의 내진성능을 발휘하면서도 제작이 용이하며 신뢰성도 높아 미국의 강진 지역에 적용이 확대되고 있다.

최근 들어 보 플랜지의 일부를 감소시키는 대신에 보 웹의 개구부를 이용하여 그 곳에 소성힌지의 발생을 유도함으로써 내진성능을 향상시키려는 방안에 대한 연구가 진행되었다. Goel 등은 보 스패의 중앙 위치에 개구부를 설치하여 전단력에 의한 개구부의 비렌덜거동을 이용하여 골조



(a) 접합부 보강



(b) 보단면의 감소

그림 1. 내진성능 향상을 위한 접합부 개선 방안

의 연성을 향상시키는 연구를 수행하였다.⁽¹⁷⁾ Halterman 등은 보의 스패에 걸쳐 다수의 개구부를 설치함으로써 개구부 주위의 비탄성 거동을 이용하여 보 전체의 연성을 증가시키는 해석적 연구를 수행하였다.⁽¹⁸⁾ Kim은 다양한 형태의 개구부를 사용하여 합성보와 철골기둥의 접합부 내진성능을 향상시키는 방안에 관한 이론적 및 실험적 연구를 수행하였다.⁽¹⁹⁾

플랜지를 도려낸 단면의 내력은 휨모멘트에 의해 결정되나 개구부 위치에서의 단면의 내력은 전단력과 모멘트의 상호작용에 의해 결정된다. 따라서 개구부를 이용하는 방안의 단점은 소성힌지 위치를 설계하기 위한 내력의 산정에 어려움이 있다는 것이다. 그러나 개구부를 이용하는 방안의 경우 설비용 덕트를 위해 설치하는 개구부를 접합부 설계에 사용할 수 있어 보 플랜지를 도려내

는 방법에 비해 경제적이다. 또한 기존 건물의 내진성능을 향상시키려 할 경우 보 플랜지를 도려내는 방법은 바닥 슬래브로 인해 상부 플랜지의 절단 작업에 어려움이 있으나 보 웨브의 개구부는 비교적 쉽게 만들 수 있는 장점이 있다.

본 연구는 노스리지 지진에 의해 큰 피해를 입은 대표적인 크기의 단면을 사용한 실물대 실험을 통해 웨브 개구부를 갖는 보-기둥 접합부의 내진성능을 조사함으로써 내진성능이 우수하면서도 보다 경제적인 접합부 형식을 제안하는데 그 목적이 있다.

2. 실험의 개요

총 4개의 캔틸레버 형 시험체에 대해 정적 반복하중 실험(cyclic static load test)을 수행하였다. 그림 2는 시험체의 치수 및 가력상황을 나타낸 것이다.

보의 단부에서 액추에이터를 사용하여 가력하였으며 동적효과를 피하기 위해 분당 15mm의 속도로 하중을 가하였다. 보 및 기둥부재의 크기는 노스리지 지진에서 가장 많은 피해를 입은 대표적인 부재들과 최대한 비슷한 크기를 선택하였다. 보부재로는 SS400의 H-792x300x14x22를 사용하였으며 기둥부재로는 SM490A의 H-458x

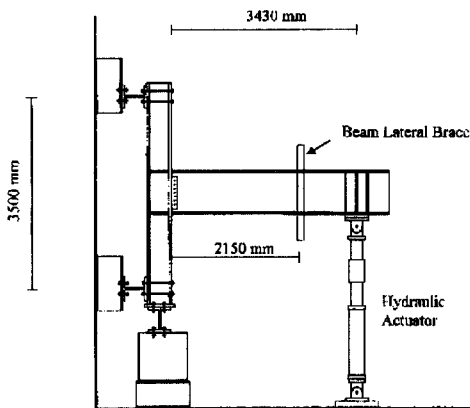


그림 2. 시험체 치수 및 가력상황

417×30×50을 사용하였다. 각 부재의 인장시험 결과가 표 1에 정리되어 있다. 시험체의 치수는 동일하며 보의 웨브 개구부의 크기 및 형상을 실험의 변수로 하였다.

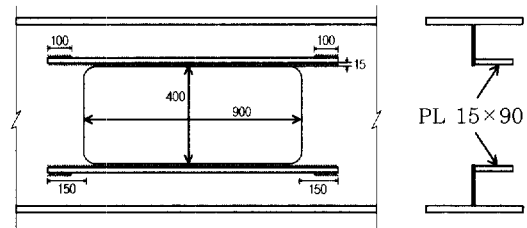
시험체 B1과 B2는 사각형의 개구부를 가지며 시험체 B3는 원형 개구부를 갖는다. 그리고 시험체 B4는 그림 3과 같이 보강된 사각형의 개구부를 갖는다.

개구부의 형상 및 크기가 표 2에 정리되어 있다. 그림 4는 접합부의 디테일을 나타내고 있다.

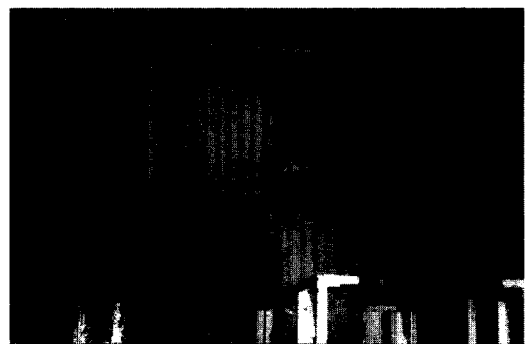
보 단부에 가해진 하중에 의해 개구부에는 전단력과 모멘트가 동시에 작용하고 있다. 개구부 위

표 1. 인장시험결과

단 면		F_y (Mpa)	F_u (Mpa)
H-792×300×14×22	플랜지	300	439
	웨브	368	478
H-458×417×30×50	플랜지	418	600
	웨브	396	577
개구부 보강 플레이트		370	541



(a) 개구부 상세



(b) 시험체 설치 상황

그림 3. 보강 개구부 시험체

표 2. 개구부 형상 및 실험결과

시험체	개구부 형상	개구부 크기 (mm)	총회전각 (rad)	파괴 모드
B1	사각형	400×400	0.02	용접부 주위 보 하부 플랜지 파단
B2	사각형	400×500	0.04	개구부 모서리 균열
B3	원형	∅510	0.05	개구부 주위 국부좌굴에 의한 강도 감소
B4	보강 사각형	400×900	0.05	개구부 모서리 균열

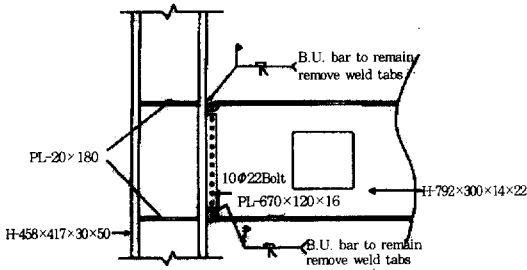


그림 4. 접합부의 상세

치에서의 보의 최대내력은 다음과 같은 ASCE의 제안식을 사용하여 구하였다.⁽²⁰⁾

$$\left(\frac{M_n}{M_m}\right)^3 + \left(\frac{V_n}{V_m}\right)^3 = 1.0 \quad (1)$$

여기서

- M_n = 최대내력에 도달했을 때 개구부의 모멘트
- V_n = 최대내력에 도달했을 때 개구부의 전단력
- M_m = 순수 모멘트가 작용할 경우의 개구부의 최대내력
- V_m = 순수 전단력이 작용할 경우의 개구부의 최대내력

그림 5는 보에 작용하는 모멘트의 분포 상황을 나타낸 것이다.

보 플랜지와 기둥 플랜지의 접합 위치에서의 모멘트 M_c 가 보의 소성모멘트 M_p 에 도달하기 전에 개구부의 위치에서의 모멘트가 개구부의 최대내력에 도달하도록 개구부의 크기를 설계하면 개

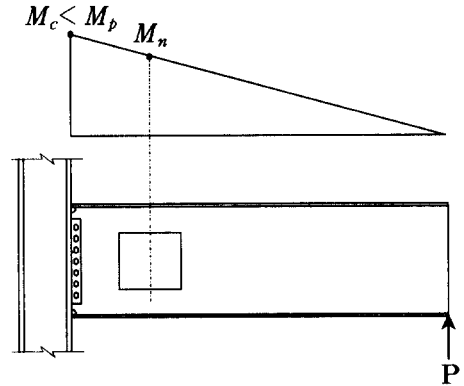


그림 5. 개구부 설계를 위한 모멘트도

표 3. 보의 모멘트 (단위 : tonf · m)

시험체	M_p	M_n	M_c	M_c/M_p	$M_{max-RBS}$	M_{max}	$M_{max-RBS}/M_n$	M_{max}/M_p
B1	228.9	163.9	213.1	0.93	176.6	230.4	1.08	1.01
B2		151.9	198.2	0.87	167.9	218.9	1.11	0.96
B3		159.5	207.9	0.91	178.8	233.2	1.12	1.02
B4		157.2	226.6	0.99	152.3	219.5	0.97	0.96

M_p : 인장실험결과를 사용하여 구한 보의 소성모멘트
 M_{max} : 실험결과 최대하중에서 접합부의 모멘트
 $M_{max-RBS}$: 실험결과 최대하중에서 개구부위치의 모멘트

구부의 위치에 소성힌지가 발생하도록 유도할 수 있다. 본 연구에서는 변형도 경화에 의한 개구부의 내력상승을 고려하여 식(1)에 의해 개구부가 최대내력에 도달할 때 접합위치의 모멘트 M_c 가 표 3과 같이 0.87 ~ 0.99 M_p 의 범위에 있도록 개구부의 크기를 결정하였다.

본 연구에서 접합부의 설계에 사용된 특징들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 보가 소성모멘트에 도달 할 때 접합부 판넬 존에 작용하는 전단력이 판넬 존의 전

단항복강도의 약 70%에 불과해 접합부의 모든 항복은 보에서 일어나도록 설계되었다.

- (2) 가장 경제적인 접합 형식으로 보 플랜지는 기둥 플랜지에 CJP(complete joint penetration) 그루브용접으로 접합되며 보의 웨브는 고력볼트를 사용하여 접합된다.
- (3) 용접은 플릭스 코어드 아크용접(FCAW)을 사용하며 용접재료는 AWS의 E71T-5에 해당하는 Supercored 70B(현대중합금속)로서 최소 Charpy 흡수에너지 20ft-lbs @-20° F를 갖는 재료를 사용하였다.
- (4) 용접은 현장상황을 고려하기 위해 시험체를 세운 상태에서 아래보기 자세로 수행하였으며 모든 용접은 비파괴시험(UT)을 통과하였다.
- (5) 용접에 사용한 탭(tabs)은 용접 후 에어 아크 가우징을 사용하여 제거하였으며 제거면은 노치효과를 없애기 위해 그라인딩을 하였다.
- (6) SAC Joint Venture에서는 하부 플랜지의 용접에 사용된 백업 바(backing bars)를 제거할 것을 권하고 있으나 백업 바의 가우징 작업은 비교적 까다로워 제작비 상승의 요인이 된다.⁽²¹⁾ 본 실험에서는 보의 웨브 개구부에 소성흔지를 유도함으로써 접합위치에서의 백업 바의 노치효과가 취성파괴에 미치는 영향을 줄일 수 있다고 판단하여 백업 바를 그대로 두었다.
- (7) 개구부의 위치는 개구부 모서리의 항복이 용접부에 영향을 미치지 않도록 기둥 플랜지 면에서 보의 춤에 해당하는 거리만큼 떨어진 위치에 오도록 설계하였다. 개구부의 길이가 긴 보강 개구부의 경우 개구부 중심의 위치가 기둥면으로부터 1050 mm 떨어진 위치에 오도록 설계하였다. 사각형 개구부는 코너 위치에 50mm 직경의 구멍을 뚫은 후 산소절단기를 사용하여 도려내었으며 절단면은 거친 부분이 없도록 그라인딩을 하였다.

표 4. 하중이력

Load Step #	Peak deformation θ	number of cycles, n
1	0.00375	6
2	0.005	6
3	0.0075	6
4	0.01	4
5	0.015	2
6	0.02	2
7	0.03	2
8	0.04	2

Continue with increments in θ of 0.01, and perform two cycle at each step

- 8) 하중은 SAC Joint Venture의 다른 접합부 실험들과의 비교를 위해 표 4와 같은 재하 방법을 적용하였다.⁽²²⁾

3. 실험결과

시험체의 하중-회전각 이력곡선이 그림 6 ~ 그림 9에 나타나 있다. 여기서 회전각은 탄성과 소성 성분을 더한 총 회전각(total rotation)으로서 보의 단부 즉 하중가력점의 변위를 하중가력점과 기둥 중심선 사이의 거리로 나눈 값으로 구해진다.

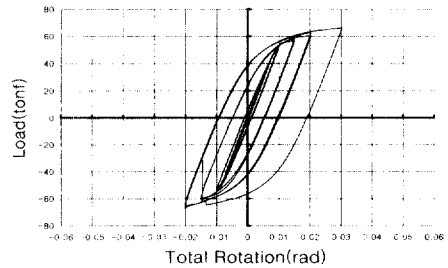


그림 6. 이력곡선(B1)

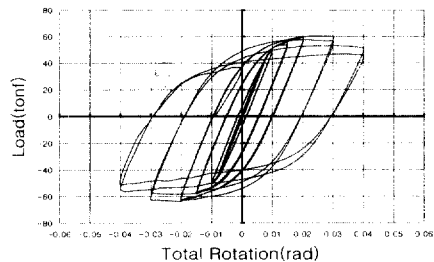


그림 7. 이력곡선(B2)

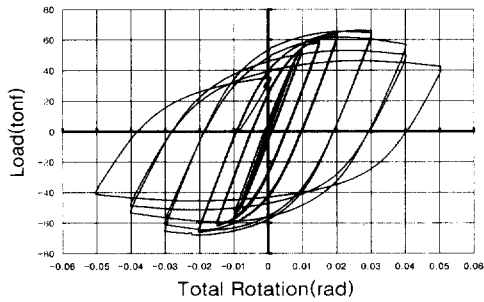


그림 8. 이력곡선(B3)

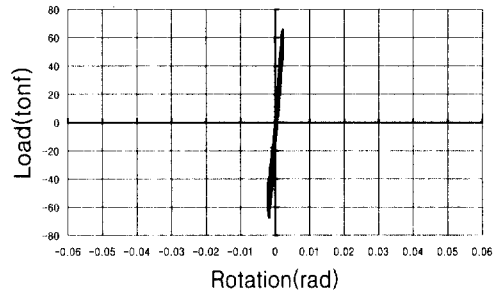


그림 10. 판넬존의 회전각(B3)

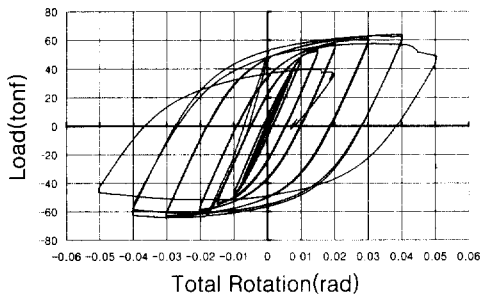


그림 9. 이력곡선(B4)

노스리지 지진이후 철골 모멘트 연성골조(steel special moment resisting frames)는 접합부가 0.03 radian 이상의 소성회전각을 발휘할 수 있도록 요구되고 있다. 한편 최근 들어 4%의 층간변위각(interstory drift angle)을 근거로 하여 접합부가 0.03 radian 이상의 소성회전각 대신에 0.04 radian 이상의 총회전각을 발휘할 수 있도록 요구하는 방안이 제시되고 있다.⁽²³⁾ 일반적으로 탄성회전각이 0.01 radian 정도에 해당하므로 결국 두 가지 경우가 비슷한 의미를 갖는다고 볼 수 있으나 본 연구에서는 총회전각을 사용하여 나타낸다.

모든 시험체들은 초기인 ± 0.005 radian의 재하 사이클에서 기둥 플랜지에 인접한 보 플랜지에서 항복선이 나타나기 시작하였으며 변위가 증가할수록 조금씩 확대되었으나 대부분의 비탄성 거동은 개구부의 주위에 집중되어 나타났다. 기둥부재의 경우 접합부 판넬 존을 제외한 곳에서는 항복선이 나타나지 않았다. 또한 기둥의 판넬 존

에는 최대내력 근처에서 약간의 항복선이 나타났으나 그림 10에서 알 수 있듯이 판넬 존의 변형에 의한 회전각이 시험체의 총 회전각에 미치는 영향은 크지 않았다.

시험체 B1은 ± 0.0075 radian의 재하 사이클에서 개구부 양단 모서리 위치의 웨브에서 항복선이 나타나기 시작하여 점차 확대 되었으며 ± 0.015 radian의 재하 사이클에서는 기둥에 가까운 개구부 단부 위치의 보 플랜지에도 항복선이 나타났다. $+0.03$ radian의 재하 사이클에 이르는 동안 개구부 양단의 비탄성 거동이 계속하여 증가하였으나 그림6과 같이 -0.03 radian의 사이클에 도달하기 직전에 보 하부 플랜지와 기둥 플랜지의 용접부 주위 열영향부의 보 플랜지가 파단함으로 취성파괴를 일으켰다. 개구부 모서리 부분에 웨브의 국부좌굴은 발생하지 않았다.

시험체 B1은 개구부가 최대내력에 도달할 때 접합부의 모멘트가 보의 소성모멘트의 93%가 되도록 설계한 시험체이나 개구부에서의 변형도 경화의 영향으로 $+0.03$ radian의 재하 사이클에서 접합부의 모멘트는 보의 소성모멘트를 상회하는 것으로 나타났다. 그림 11은 실험이 끝난 후의 시험체 B1이며 그림 12는 플랜지의 파단을 보여주고 있다. 시험체 B1의 실험결과를 근거로 개구부의 크기를 증가시키는 것이 보다 우수한 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단되었다. 표 2와 같이 시험체 B2는 개구부가 최대내력에 도달할 때 접합부의 모멘트가 보의 소성모멘트의 87%

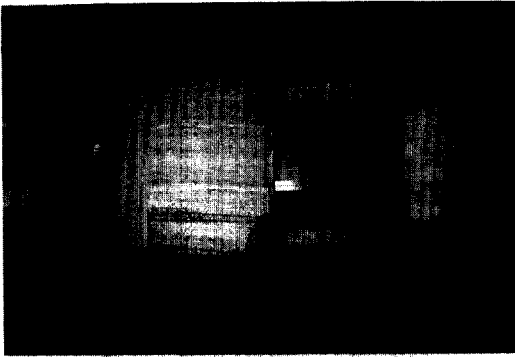


그림 11. 실험후 상황(B1)

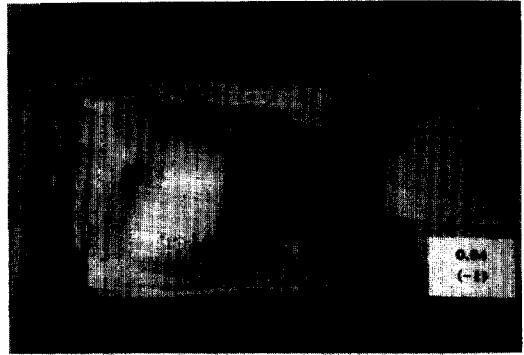


그림 13. 실험후 상황(B2)



그림 12. 보 플랜지 파단(B1)

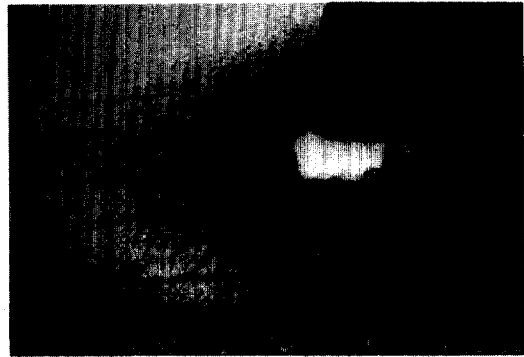


그림 14. 개구부 모서리 균열(B2)

가 되도록 개구부의 크기를 설계한 시험체이다.

그림 7에서 알 수 있듯이 시험체 B2는 매우 우수한 거동을 나타내었다. ± 0.005 radian의 재하 사이클에서 개구부 양단 모서리 위치의 웹에서 항복선이 나타나기 시작하였으며 ± 0.01 radian의 재하 사이클에서는 기둥에 가까운 개구부 단부 위치의 보 상하 플랜지에도 항복선이 나타났다. ± 0.03 radian의 재하 사이클에서 개구부 네 모서리 부분 웹에 국부좌굴이 발생하면서 최대하중이 조금씩 감소하기 시작했다. ± 0.04 radian의 첫 번째 사이클에서 웹의 국부좌굴이 보다 진전되면서 기둥에 가까운 개구부 단부 위치의 보 상하 플랜지에도 좌굴이 발생하기 시작했으며 이에 따라 최대하중이 보다 크게 감소하였다. $+0.04$ radian의 두 번째 사이클에서 기둥 쪽 개구부 하단 모서리에 균열이 발생하

였다. -0.04 radian의 두 번째 사이클에서 반대편 모서리에 균열이 발생하였으며 이 사이클의 완성 후 실험을 끝냈다. 그림 13은 실험이 끝난 후의 시험체 B2를 보여주고 있으며 그림 14는 개구부 모서리의 균열을 나타낸 것이다.

시험체 B3는 직경 510mm의 원형 개구부를 갖는 실험체로서 그림 8과 같이 매우 우수한 거동을 나타내었다. ± 0.0075 radian의 재하 사이클에서 개구부 중심을 지나는 수직선에서 좌우 30° 위치의 웹에 항복선이 나타나기 시작하였으며 ± 0.01 radian의 재하 사이클에서는 기둥에 가까운 쪽 개구부 항복 위치의 보 플랜지에도 항복선이 나타났다. ± 0.03 radian의 재하 사이클에서 기둥에 가까운 쪽 항복 위치에서 웹 및 플랜지의 국부좌굴이 동시에 발생하기 시작하였으며 재하 사이클이 계속되면서 하중이 조금씩

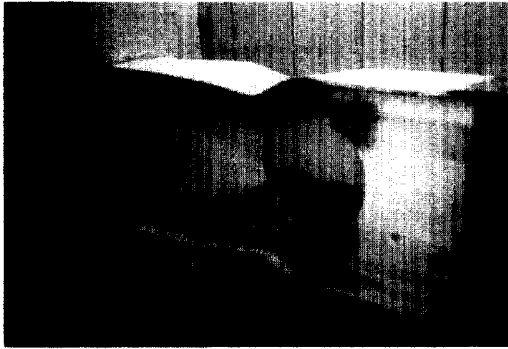


그림 15. 실험후 상황(B3)

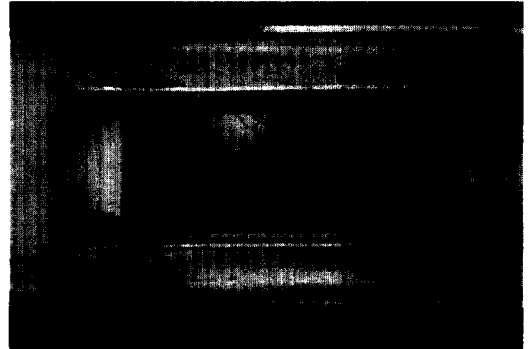


그림 16 실험후 상황(B4)

감소하기 시작했다. ± 0.04 radian의 재하 사이클에서는 기둥에 가까운 쪽 웨브 및 플랜지의 국부좌굴이 점차 심해지면서 하중도 큰 폭으로 감소하였다. 기둥에서 먼 쪽의 항복 위치에서는 웨브의 국부좌굴은 발생하나 플랜지의 국부좌굴은 발생하지 않았다. ± 0.05 radian의 첫 번째 사이클을 완성한 후 개구부 주위의 지나친 변형으로 인해 실험을 끝내었다. 개구부에 균열은 발생하지 않았다. 그림 15는 실험이 끝난 후의 시험체 B3를 보여주고 있다.

시험체 B4는 사각형 개구부 주위를 보강한 시험체로서 개구부 양단에서 보강 플레이트가 웨브의 국부좌굴을 구속함으로써 보다 우수한 내진 성능을 발휘할 수 있을 것으로 기대되었다. 그림 9에서 알 수 있듯이 보강 개구부를 갖는 접합부는 비보강의 경우에 비해 보다 안정적인 거동을 나타내었다. ± 0.0075 radian의 재하 사이클에서 개구부 양단 모서리 위치의 웨브에서 항복선이 나타나기 시작하였다. ± 0.01 radian의 재하 사이클에서는 기둥에 가까운 개구부 단부 위치의 보 상하 플랜지에도 항복선이 나타났으며 ± 0.015 radian의 재하 사이클에서는 개구부 양단 모서리 위치의 보강 플레이트에도 항복선이 나타났다. ± 0.03 radian의 재하 사이클에서 개구부 모서리 부분 웨브 및 보강 플레이트에 국부좌굴이 발생하였으나 하중은 감소하지 않았다. ± 0.04 radian의 재하 사이클에서 웨브 및 보강 플

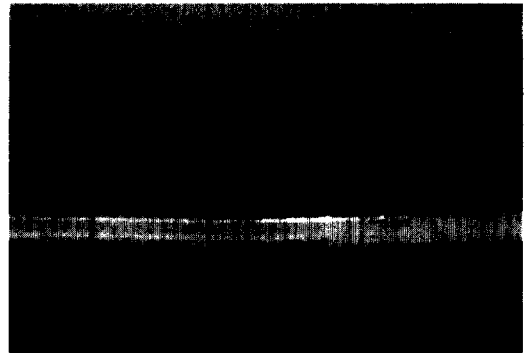


그림 17. 개구부 모서리 균열(B4)

레이트의 국부좌굴이 보다 진전되면서 개구부 모서리에 균열이 발생하였으나 하중은 크게 감소하지 않았다. ± 0.05 radian의 첫 번째 사이클에서 개구부 모서리의 균열이 크게 발전하면서 하중이 큰 폭으로 감소하였으며 이 사이클의 완성 후 실험을 끝내었다. 그림 16은 실험이 끝난 후의 시험체 B4를 보여주고 있으며 그림 17은 개구부 모서리의 균열을 나타낸 것이다.

그림 18과 그림 19는 각각 시험체 B2와 B3의 개구부 중앙 위치에서 보 플랜지의 횡방향 변위 측정값을 나타낸 것이다. 앞에서 설명하였듯이 사각형 개구부의 경우 국부좌굴은 개구부 모서리 웨브에 집중되며 플랜지에는 약간의 국부좌굴이 발생하나 원형 개구부의 경우 웨브와 플랜지가 동시에 국부좌굴을 일으켰다. 그림 8과 그림 19는 원형 개구부의 경우 개구부 주위의 국부좌굴

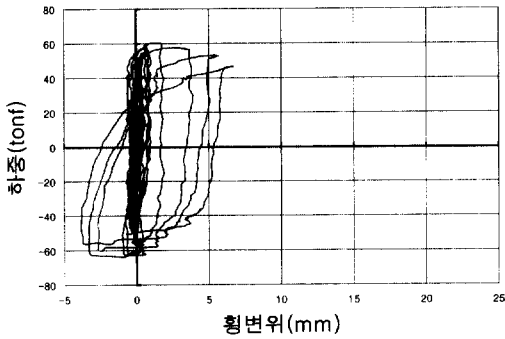


그림 18. 횡변위(B2)

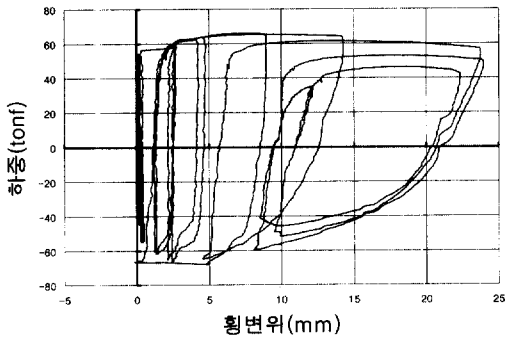


그림 19. 횡변위(B3)

발생하는 ± 0.03 radian의 재하 사이클에서 보 플랜지의 횡방향 변위가 급격히 증가함을 보여 주고 있다. 따라서 원형 개구부의 경우 개구부 주위의 국부좌굴이 보의 횡비틀림좌굴로 이어지면서 하중의 감소가 발생한 것으로 판단되며 사각형 개구부의 경우 개구부 모서리 부분의 균열이 하중 감소의 주요 원인인 것으로 판단된다.

시험체들이 발휘한 최대 총회전각과 파괴모드가 표2에 나타나 있다. 이 실험결과를 dogbone 접합부의 경우¹⁵⁾와 비교해 보면 0.04 radian 이상의 총 회전각을 발휘하면서도 최대내력 도달 후 강도저하가 적은 dogbone 접합부에 비해 개구부를 갖는 접합부의 경우 최대내력 도달 후 강도저하로 인해 내진성능이 다소 부족하나 B1 시험체를 제외한 모든 실험체가 목표치인 0.04 radian의 총회전각을 발휘할 수 있었다.

4. 결론

보-기둥 접합부의 내진성능을 개선하기 위해 소성힌지의 발생위치를 취성파괴가 발생할 수 있는 보 플랜지와 기둥 플랜지의 접합 위치로부터 보 내부 쪽으로 이동시키는 방안들에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 본 연구는 동일한 목적으로 설비 덕트용 웨브 개구부를 이용하는 방안에 관한 실험적 연구로서 실험을 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 개구부의 크기를 적절하게 설계할 경우 강진지역에 대해 요구되는 0.04 radian의 총회전각을 발휘할 수 있다.
- (2) 사각형 개구부의 경우 개구부 모서리에서 발생하는 균열이 내력 감소의 주요 원인이 되었다.
- (3) 원형 개구부의 경우 개구부 주위의 국부좌굴이 보의 횡비틀림 좌굴로 이어지면서 내력이 감소하였다.
- (4) 보강 개구부의 경우 보강 플레이트에 의해 개구부 모서리의 국부좌굴이 감소하면서 비보강에 비해 보다 안정적인 거동을 하나 결국 개구부 모서리에서 발생하는 균열에 의해 내력이 감소하였다.

감사의 말

본 연구는 한국학술진흥재단 1999년 신진교수 연구과제로서 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. SAC. "Surveys and Assessment of Damage to Buildings Affected by the Northridge Earthquake of January 17, 1994." Technical Report SAC 95-06, SAC Joint Venture, Sacramento, California, 1995.
2. AIJ. "Performance of Steel Buildings during the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake."

- Tokyo, Architectural Institute of Japan, 1995
3. Engelhardt, M., Sabol, T., Aboutaha, R., and Frank, K., "An Overview of the AISC Northridge Moment Connection Test Program," Proceedings of AISC National Steel Construction Conference, San Antonio, TX, AISC, 1995.
 4. Engelhardt, M., and Sabol, T., "Reinforcing of Steel Moment Connections with Cover Plates:" Benefits and Limitations, Engineering Structures, Vol. 20, Nos. 4-6, April June 1998.
 5. Uang, C.-M. and Bondad, D., "Static Cyclic Testing of Pre-Northridge and Haunch Repaired Steel Moment Connections." SAC 96-01, Part 1, pp. 3-1_3-139, Sacramento, Calif, 1996.
 6. Uang, C.-M., Bondad, D., Lee, C.-H. , "Cyclic Seismic Performance of Haunch Repaired Steel Moment Connections, Experimental Testing and Analytical Modeling," Engineering Structures, Vol. 20, Nos. 4-6, pp. 552-561, 1998.
 7. Whittaker, A., and Gilani, A. "Cyclic Testing of Steel Beam-Column Connections." Report No. EERC-STI/96-04. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1996.
 8. Plumier, A., "The Dogbone": Back to the Future, Engineering Journal, AISC, 2nd Quarter, Vol. 34, No. 2, 1997.
 9. Chen, S. J., Yeh, C. H., and Chu, J. M., "Ductile Steel Beam-to-Column Connections for Seismic Resistance," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 11, November 1996.
 10. Iwankiw, N. R., and Carter, C. J., "The Dogbone: A New Idea to Chew On, Modern Steel Construction," AISC, Vol. 36, No. 4, April 1996.
 11. Zekioglu, A., Mozaffarian, H., and Uang, C., "Moment Frame Connection Development and Testing for the City of Hope National Medical Center," Proceedings: Structures Congress XV, Portland, American Society of Civil Engineers, 1997.
 12. Tremblay, R., Tchebotarev, N., and Filiatrault, A., "Seismic Performance of RBS Connections for Steel Moment Resisting Frames: Influence of Loading Rate and Floor Slab," Proceedings: STESSA97, Kyoto, Japan, 1997.
 13. Iwankiw N., "Ultimate Strength Considerations for Seismic Design of the Reduced Beam Section(Internal Plastic Hinge)," Engineering Journal, AISC, First Quarter, Vol. 34, No. 1, 1997.
 14. Grubbs, K. V., "The Effect of the Dogbone Connection on the Elastic Stiffness of Steel Moment Frames," Masters Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, TX, August 1997.
 15. Engelhardt, M. D., Winneberger, T., Zekany, A. J., and Potyraj, T. J., "Experimental Investigation of Dogbone Moment Connections," Engineering Journal, AISC, Fourth Quarter, Vol. 35, No. 4, 1998.
 16. Venti, M. J., "Experimental Investigation of Reduced Beam Section Connections With Composite Slabs,"Masters Thesis, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, TX, May 2000.
 17. Goel, S., Leelataviwat, S., and Stojadinovic, B., "Steel Moment Frames With Ductile Girder Web Opening," Engineering Journal AISC, Fourth Quarter, Vol. 34, No. 4, 1997
 18. Halterman, A., and Aschheim, M., "Analytical studies of Shear-Yielding Moment-Resistant Steel Frames," Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, NZ, January 2000.
 19. Kim, W.K., "Web Opening of Steel and Composite Beams for Ductile Moment

- Resisting Connections". International Seminar on Recent Technology for Concrete-Steel Composite systems, Seoul, Korea, November 2000.
20. ASCE Task Committee on Design Criteria for Concrete Structures in Steel and Concrete., Proposed specification for structural steel beams with web openings. J. Struct. Engrg., ASCE, 118(12), 3315-3324, 1992.
 21. SAC Joint Venture, Interim guidelines: evaluation, repair, modification and design of steel moment frames, Report No. SAC-95-02, Sacramento, 1995.
 22. Clark, P., Protocol for Fabrication, Inspection, Testing, and Documentation of Beam Column Connection Tests and Other Experimental Specimens, Background Document No.97/02, SAC joint Venture. Sacramento, 1997.
 23. SAC Joint Venture, Seismic Design Criteria for New Moment Resisting Steel Frame Construction, Report No. FEMA350, Sacramento, 2000.

(접수일자 : 2001년 4월 2일)