

반복하중을 받는 유공 H-형강 보의 소성 거동

Inelastic Behavior of H-Shaped Beams with Web Openings under Cyclic Loading

이 은 택¹⁾

Lee, E. T.

요 약 : Darwin의 식을 근거로 하여 9개의 유공 H-형강 보의 소성영역에서의 반복 거동을 알아보았다. 이 실험을 통하여 기존의 식, 소성힌지의 효과, 개구부 주위의 크랙 발생 및 파단 이후의 소성거동을 연구하고자 한다. 이 실험의 변수는 개구부 치수, 개구부의 위치 및 갯수, 개구부간의 거리이다. 본 실험을 통하여, 국부좌굴이나 개구부의 균열 발생 이후 5~10 사이클에서의 유공보의 내력은 각 실험체 최대내력의 50% 내외로 감소하는 양상을 보였고, 이러한 현상은 일반 H-형강 보의 국부좌굴 후 내력저하와 비교하여 매우 심각한 것으로 나타났다. 따라서, 지진하중과 같은 소성 반복하중에 대한 폭-두께비의 고려나 보강재의 사용 등이 검토되어야 한다.

ABSTRACT : A total of nine H-shaped beams with web openings under cyclic loading condition were investigated. The dimension criteria are based on the formulae proposed by Darwin. The suitability of existing design formulae, the effects of plastic hinge on beams with web openings, the fracture around the web openings, and the influence of cracks neighboring web openings to the beam strength under cyclic loading were also investigated through the observation of the behavior of these beams with various opening dimensions, locations, numbers, and spacing between the two openings.

핵심용어 : 개구부, 소성, 반복하중, 파괴, 내력저하, 강성저하

KEYWORDS : web opening, inelastic behavior, cyclic loading, fracture, strength deterioration, stiffness deterioration

1. 서론

최근 건축물은 고층화되고 있고 설비의 고도화가 요구되고 있다. 이에 따라 건물에서 각 층간 소요 설비 공간이 늘어나는 추세이다. 건물은

여러 가지 이유로 그 높이가 제한되므로 높이 기준을 만족시키면서 층수를 증가시켜야 할 필요성이 발생하게 된다.

보에 개구부를 설치하는 유공보 시스템은 보 층간에 공간을 형성할 수 있어 이와 같은 요구조건

1) 정회원, 중앙대학교 공과대학 건축학과 전임강사, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2002년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

을 만족시키는 데 효과적이다. 특히 철골 구조가 적용된 건물의 경우 보 웨브에 개구부를 설치할 수 있기 때문에 유공보의 사용은 더욱 효과적이다.

유공보 시스템은 건물의 높이를 줄이는 효과로 인하여 층모멘트를 작게 해서 구조 부재의 사용량을 감소시킬 수 있다. 또한 외장재와 설비공간 감소로 인한 층간 강재량의 절약을 기대할 수 있다. 그러나 이러한 많은 장점에도 불구하고 유공보 시스템은 부재의 전단 내력과 모멘트 내력을 감소시키는 단점이 있다.

유공보에 관한 연구는 1964년 Segner의 유공보에 요구되는 보강량에 관한 연구가 최초로 수행되었다.⁽¹³⁾ Bower는 1968년 보강되지 않은 직사각형 개구부를 갖는 유공보 실험을 통해 소성 거동과 극한 강도를 예측하는 문제를 연구하였다.⁽⁴⁾ 1971년 Frost는 반복하중을 받는 개구부의 피로 현상에 대하여 연구하였다.⁽⁸⁾ Redwood는 1968년 H형강 구형 유공 웨브 보의 탄성거동에 관한 실험적 연구 및 다공보의 종국강도에 관한 연구를 함께 수행하고, 이후 1972년에 구형 유공보의 소성설계표를 제안하였으며, 1979년에는 한쪽면만 보강한 H-형강 보에 대한 연구와 얇은 웨브에 무편심 개구부를 갖는 보에 대하여 웨브 포스트의 좌굴에 대한 문제와 유공보의 임계하중에 대한 연구를 수행하였다.^{(9)~(12)} 1981년에는 Dougherty가 유공보 웨브 포스트의 좌굴에 대한 연구를 발표하였다.⁽⁷⁾ 이밖에도 유공보에 관한 연구는 Cooper 및 Snell 등에 의하여 활발하게 이루어졌다.⁽⁵⁾ 이후 Darwin에 의한 유공보 설계 기준식이 1990년 AISC-Steel Design Guide로 발행되었다.⁽⁶⁾ 우리 나라에서는 1980년 김규석, 김종락이 무보강 유공보의 강성에 관한 연구를 수행하였다.⁽²⁾ 또한, 이승준, 김원기에 의해 유공 합성보의 극한내력에 대한 연구가 1995년에 수행되었다.⁽³⁾

이처럼 지금까지 유공보에 대한 연구는 다수가 수행되었고, 기존의 연구결과를 토대로 Darwin에 의하여 설계식이 제안되어 있는 상황이다.

그러나 국내의 경우 유공보 시스템은 현재까지 국내 설계기준이 마련되어 있지 않은 상황에서 설계자의 경험 등에 의존하여 적용되어 왔다. 또한 반복하중을 받는 유공보의 소성거동에 대한 실험은 많은 연구가 수행되지 않은 실정이다.⁽¹¹⁾

따라서, 본 연구에서는 국내에서 생산되는 H-형강을 대상으로 개구부 형상, 개구부 개수, 개구부 간격 등을 주요 변수로 하여 Darwin의 설계 제안식에 기초하여 웨브에 개구부를 제작하고 반복하중 재하 실험을 실시하였다. 이를 통해 반복하중 하에서 유공보의 소성영역에서의 거동을 관찰하여 설계제안식의 적용성을 검토하고 부재의 최대내력, 개구부 주변의 국부좌굴이나 균열의 발생, 균열의 발전양상, 균열 발생 후의 내력저하, 파괴양상 등 구조적 거동을 연구함으로써 실무에서 활용될 수 있는 설계 기초자료를 제공하는 데 연구의 목적을 두었다.

2. 재료의 역학적 성질

2.1 인장 시험

실험에 사용된 SS400의 재료 역학적 성질을 파악하기 위하여 강재의 인장강도 시험을 실시하였다. 인장강도 실험에 사용된 시험편은 한국산업규격 KS B 0801에 명시된 금속재료 인장 시험편 중 5호 시험편으로 제작하였다. 시험편은 실험체와 동종인 H-194×150×6×9에서 웨브(TW1, TW2)와 플랜지(TF1, TF2)에서 각각 두 개씩 절편하여 제작하였다.

강재의 인장강도 시험결과는 표 1에 나타나 있다.

표 1. 인장 시험 결과

시험편명	σ_y (tf/cm ²)	σ_{max} (tf/cm ²)	항복비 (%)	연신율 (%)	항복 변형도 ($\times 10^{-6}$)	탄성 계수 (tf/cm ²)
TW1	3.50	4.80	73	35	1516	2308.71
TW2	3.64	4.81	76	31	1675	2173.13
평균	3.57	4.81	74	33	1595.5	2240.92
TF1	3.33	4.67	71	35	1526	2182.18
TF2	3.17	4.54	70	36	1466	2162.35
평균	3.25	4.61	71	36	1496	2172.27

2.2 실험체 설계

실험체는 국내에서 생산되는 H-194×150×6×9으로 강재는 SS400을 사용하였다. 개구부 형태는 Darwin의 제안식에 따라 개구부 춤이 최대인 경우(depth critical), 개구부 길이가 최대인 경우(length critical), 두 경우의 평균인 경우(normal)로 각 경우 세 개씩, 총 9 개 실험체를 제작하였다. 또한 개구부가 한 개인 경우 개구부의 위치는 모멘트-전단력비(M/V비)가 330인 경우와 670인 경우로 설계하였고, 개구부가 두 개인 경우는 Darwin의 제안식에 따라 해당 개구부 형태에 대하여 최소간격이 되도록 설계하였다.

실험체는 Darwin⁽⁶⁾의 설계식에 따라 다음과 같이 설계되었다. 개구부 각부의 명칭은 그림 1과 같다.

I. 압축 플랜지의 좌굴

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{17.2}{\sqrt{F_y}}$$

II. 웨브좌굴 및 최대 공칭전단력 V_m

$$\frac{d-2t_f}{t_w} \leq \frac{111.36}{\sqrt{F_y}} \text{ 을 만족할 경우}$$

$$\frac{a_0}{h_0} \leq 3.0 \text{ 그리고 } V_m \leq \frac{2}{3} V_p$$

III. 개구부 치수

$$h_0 \leq 0.7d$$

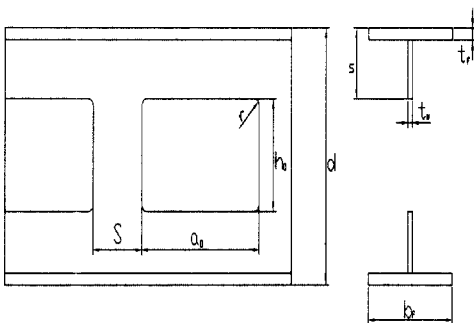


그림 1. 개구부 각부 명칭

$$p_0 = \frac{a_0}{h_0} + \frac{6h_0}{d} \leq 5.6$$

IV. 티(Tee) 치수

· 춤(depth) : $s \geq 0.15d$

· 형상비(aspect ratio) ($\nu = \frac{a_0}{s}$) : $\nu \leq 12$

V. 기타 고려사항

(1) 안정성(stability)

$$\nu = \frac{a_0}{s} \leq 4.0 \text{ 일 경우 검토하지 않아도}$$

상관 없음.

(2) 모서리 반지름

$$r \geq 2t_w \text{ 혹은 } 1.59\text{cm}$$

(3) 집중 하중

· 지점에서 '보의 춤(d)' 이상 간격 유지

· 재하점은 개구부 가장자리에서 $\frac{d}{2}$ 이상 거리 유지

(4) 개구부 사이 간격

$$S \geq h_0, \text{ 그리고 } S \geq a_0 \left(\frac{\frac{V_u}{\phi V_p}}{1 - \frac{V_u}{\phi V_p}} \right)$$

여기서, V_u 는 계수화된 전단력이고, $\overline{V_p}$ 는 개구부가 없는 보의 소성전단강도이다. 설계식에 의해 제작된 실험체 일람은 표 2와 그림 2에 나타나 있다.

표 2. 실험체 일람

실험체		F_y (tf/cm^2)	h_c (mm)	a_0 (mm)	s (mm)	S (mm)	M/V (mm)
Depth Critical Case	RDS-1	3.4	135	118	29.5	-	330
	RDS-2					-	670
	RDD					193	-
Length Critical Case	RLS-1		65	195	64.5	-	330
	RLS-2					-	670
	RLD					318	-
Normal Case	RNS-1		100	157	47	-	330
	RNS-2					-	670
	RND					257	-

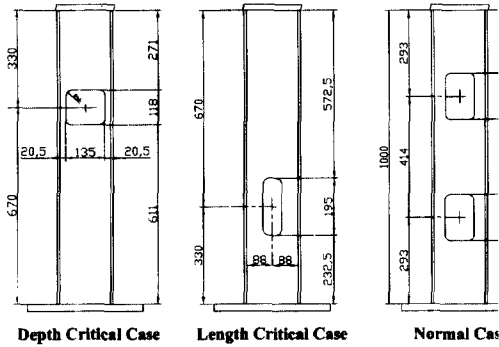


그림 2. 실험체 형상 (단위 : mm)

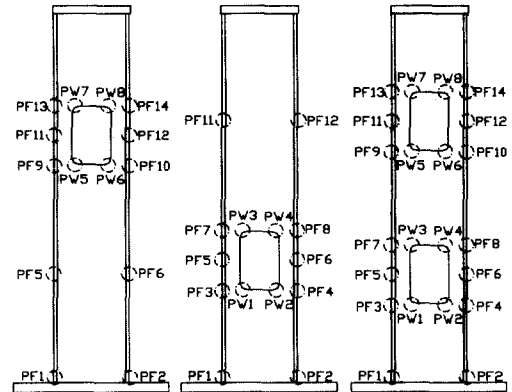


그림 4. 실험체 부위별 명칭

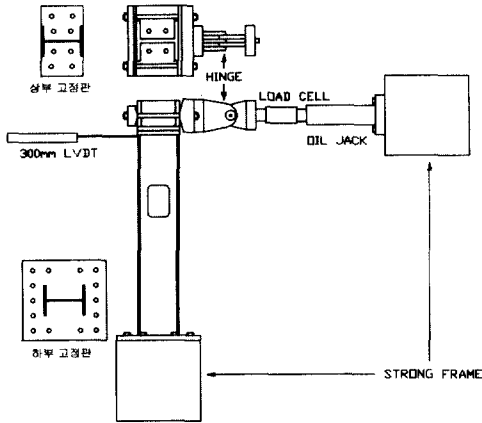


그림 3. 가력장치 및 실험체 세팅

2.3 실험 방법

실험은 중앙대학교 소재 건축구조실험실에서 스트롱 프레임을 이용하여 실시하였다. 실험체 및 각종 장비 상황은 그림 3에 나타나있다. 60tf 용량의 오일잭을 이용하여 가력속도 0.1mm/s로 정속 가력하였다. 하중재하는 변위제어 방식으로 변위를 10mm에서 시작하여 10mm씩 증가시켰으며, 실험체에서 변형이 관찰되는 시점을 기준으로 실험체에서 변형이 관찰되기 전 2회 정(+), 부(-) 반복 가력하고, 실험체에서 변형이 관찰된 이후 5회 정(+), 부(-) 반복 가력하였다.

하중은 복동식 로드셀(압축 60tf, 인장 35tf)을 이용하여 측정하였다. 또한 실험체 자유단의

변형량을 측정하기 위해 실험체 자유단 가력점 반대편에 300mm LVDT를 설치하였다.

스트레인게이지는 플랜지에 세 곳, 웹 개구부 주변에 두 곳에 설치하여 변형률을 측정하였다(그림 4 참조). 실험은 실내온도에서 이루어졌으며, 국부좌굴이나 개구부 주변의 크랙과 같은 변형은 육안으로의 검토와 실험결과도의 그래프를 이용하여 측정되었다.

3. 실험 결과

3.1 파괴 양상

초기 첫 번째와 두 번째 사이클(10mm) 가력에 서는 실험체에서 큰 변화는 관찰되지 않았다. 하중이 반복적으로 재하되면서 웹 개구부 모서리 부분에서 소성힌지가 형성되어 개구부를 중심으로 실험체 변형이 발생하였다. 이어 웹의 같은 위치에서 균열이 발생하고 같은 변위사이클을 반복하는 경우에도 균열발생 위치의 재료항복으로 인하여 균열의 깊이가 더욱 증가하였다(사진 1 참조). 결국 이 균열의 발전으로 인해 실험체가 파괴되어 실험을 종료하였다.

Depth critical case는 개구부 위치나 개구부 개수와 무관하게 가장 낮은 강도를 나타냈다. Length critical case는 보편적으로 가장 큰

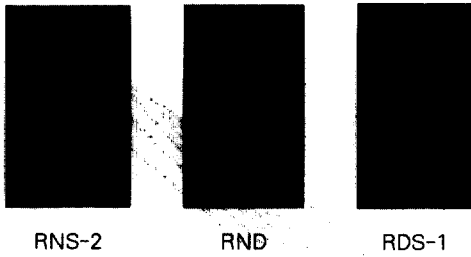


사진 1. 실험체의 파괴양상

강도를 나타냈다. Normal case는 개구부 길이가 최대인 실험체의 강도와 비교할 때 큰 차이를 나타내지는 않았다.

3.2 Depth Critical Case

Depth critical case 실험체는 최대하중의 89~100% 범위에서 부재균열이 발생하였다. Length critical case나 normal case에 비해 최대내력이나 소성힌지의 발생하중, 탄성한계가 상대적으로 낮은 경향을 보였다.

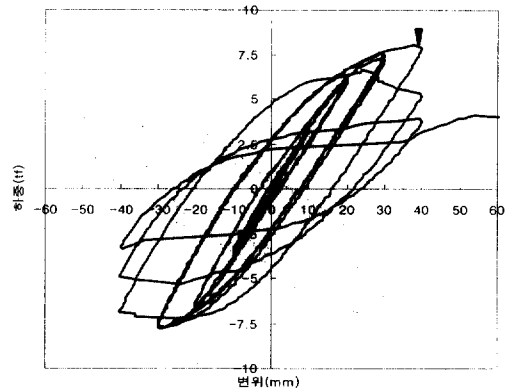
3.2.1 RDS-1 실험체

최대하중은 10번째 사이클 정방향 가력 완료 시 7.9tf이었다. 최초 개구부 주변의 변형은 5번째 사이클 정방향 가력 중 변위와 하중이 각각 26.62mm, 7.1tf일 때 PF9, PF10, PF13, PF14위치에서 발생하였다. 또한, 최초의 부재균열은 9번째 사이클 부방향 가력 중 변위와 하중이 각각 28.44mm, 7.7tf일 때 PW7위치에서 발생하였고 이는 최대하중의 97%범위이다.

실험체 부위별 변형도로 해당 부위의 항복 여부를 살펴보면 부재의 균열이나 국부좌굴에 의한 내력저하가 발생하기 이전 시점에서 웹 개구부 주변과 플랜지 지점부에서 변형도가 이미 항복변형도에 도달하여 실험체 부분적으로 재료의 항복이 발생한 것을 알 수 있다.

3.2.2 RDS-2 실험체

최대 하중은 8번째 사이클 부방향 가력 완료 시



▼ 표시는 실험체 균열 발생 시점
그림 5. RDS-1 하중-변위 곡선

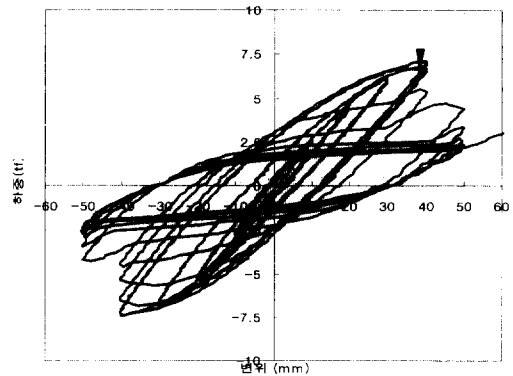


그림 6. RDS-2 하중-변위 곡선

7.3tf이었다. 최초 개구부 주변 변형은 7번째 cycle 정 방향 가력 중 변위와 하중이 각각 35.49mm, 6.6tf일 때 PF3, PF4, PF7, PF8위치에서 발생하였다. 최초 부재균열은 7번째 사이클 부방향 가력 중 변위와 하중이 각각 39.45mm, 7.3tf일 때 PW3위치에서 발생하였고 이는 최대하중의 100%범위이다.

3.2.3 RDD 실험체

최대하중은 8번째 사이클 정 및 부방향 가력 완료 시 6.4tf이었다. 최초 개구부 주변 변형은 7번째 사이클 정방향 가력 중 변위와 하중이 각각 34.50mm, 6.1tf일 때 발생하였다. 최초 부재균열은 8번째 사이클 부방향 가력 중 변위와 하중

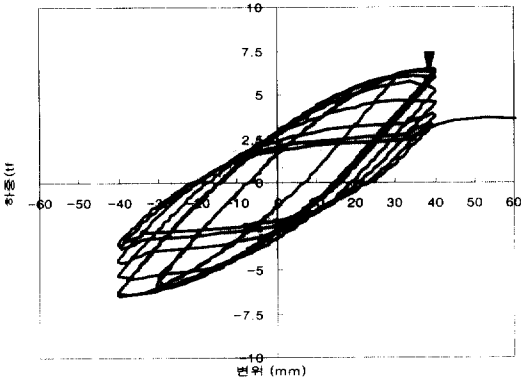


그림 7. RDD 하중-변위 곡선

이 각각 37.76mm, 6.4tf일 때 PW2, 및 PW3 위치에서 발생하였고 이는 최대하중의 100%범위이다.

3.3 Length Critical Case

Length critical case 실험체는 최대하중의 94~98% 범위에서 부재균열이 발생하였다. Depth critical이나 normal case에 비해 최대내력이나 소성힌지 발생 하중, 탄성한계가 상대적으로 높은 경향을 보였다.

실험체 부위별 변형도로 해당 부위의 항복 여부를 살펴보면 부재의 균열이나 국부 좌굴에 의한 내력 저하가 발생하기 이전 시점에서 웨브 개구부 주변과 플랜지 지점부에서 변형도가 이미 항복 변형도에 도달하여 실험체 부분적으로 재료의 항복이 발생한 것을 알 수 있다.

3.3.1 RLS-1 실험체

실험 중 10번째 사이클 부방향 가력 완료후 제하(unloading) 중 실험체 용접부가 파괴되어 실험을 종료하였다. 용접부 파괴 시점까지 최대 하중은 10번째 사이클 부방향 가력 완료시 8.7tf이었다.

3.3.2 RLS-2 실험체

실험 중 13번째 사이클 부방향 가력 완료 후

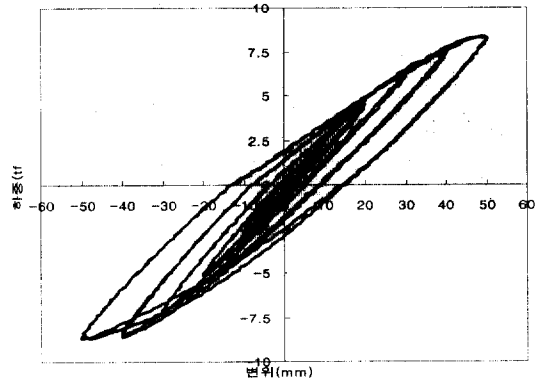


그림 8. RLS-1 하중-변위 곡선

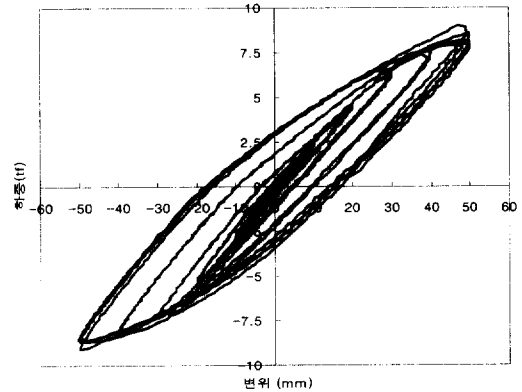


그림 9. RLS-2 하중-변위 곡선

제하(unloading) 중 실험체 용접부가 파괴되어 실험을 종료하였다. 용접부 파괴 시점까지 최대 하중은 12번째 사이클 부방향 가력 완료 시 9.1tf이었다. 최초 개구부 주변 변형은 9번째 사이클 정방향 가력 중 변위와 하중이 각각 50.01 mm, 8.0tf일 때 PF1, PF2, PF3, PF4위치에서 발생하였다.

3.3.3 RLD 실험체

최대하중은 9번째 사이클 부방향 가력 완료 시와 10번째 사이클 정방향 가력 완료 시 9.3tf이었다. 최초 개구부 주변 변형은 9번째 사이클 정방향 가력 중 변위와 하중이 각각 48.72mm, 9.1tf일 때 PF3, PF4, PF7, PF8위치에서 발생하였다. 최초 부재균열은 9번째 사이클 정방향 가력

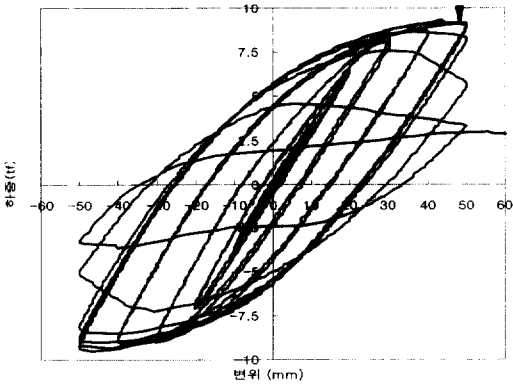


그림 10. RLD 하중-변위 곡선

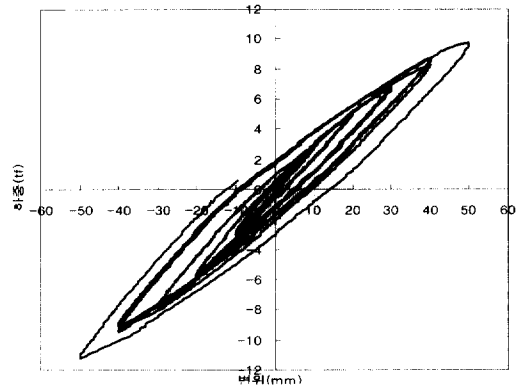


그림 11. RNS-1 하중-변위 곡선

중 변위와 하중이 각각 48.72mm, 9.1tf일 때 PW4위치에서 발생하였고 이는 최대하중의 98% 범위이다.

3.4 Normal Case

Normal case 실험체는 최대하중의 80~92% 범위의 하중에서 소성흔지가 발생하였고, 최대하중의 79~100%범위에서 부재균열이 발생하였다. Depth critical case에 비해 최대내력이나 소성흔지 발생하중이 상대적으로 높은 경향을 보였으나 length critical case와 비교할 때 최대내력이나 소성흔지 발생하중, 탄성한계가 개구부 위치나 개구부 개수에 따라 높은 값과 낮은 값을 나타냈다.

모든 실험체에서, 실험체 부위별 변형도로 해당 부위의 항복이부를 살펴보면 부재의 균열이나 국부좌굴에 의한 내력저하가 발생하기 이전 시점에서 웹 개구부 주변과 플랜지 지점부에서 변형도가 이미 항복 변형도에 도달하여 실험체 부분적으로 재료의 항복이 발생한 것을 알 수 있다.

3.4.1 RNS-1 실험체

실험 중 12 번째 사이클 부방향 가력 중 46.71mm 변위일 때 실험체 용접부가 파괴되어 실험을 종료하였다. 용접파괴 시점까지 최대하중은 12번째

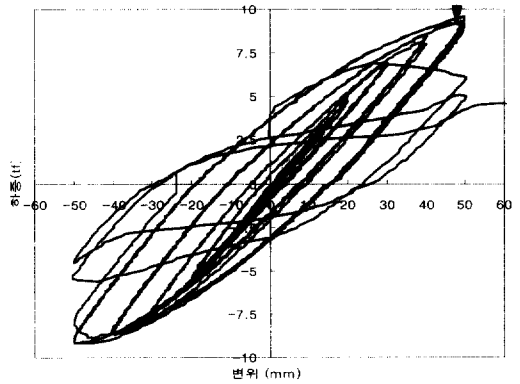


그림 12. RNS-2 하중-변위 곡선

사이클 정방향 가력완료시 9.7tf이었다. 최초 개구부 주변의 변형은 7번째 사이클 부방향 가력 중 변위와 하중이 각각 38.79mm, 8.9tf일 때 PF9, PF10, PF13, PF14위치에서 발생하였고 이는 최대하중의 92%범위이다.

3.4.2 RLS-2 실험체

최대하중은 13번째 사이클 정방향 가력완료 시 9.5tf이었다. 최초 개구부 주변의 변형은 7번째 사이클 정방향 가력 중 변위와 하중이 각각 34.62mm, 7.6tf일 때 PF3, PF4, PF7, PF8위치에서 발생하였다.

3.4.3 RND 실험체

최대하중은 7번째 사이클 부 방향 가력 완료 시

9.1tf이었다. 최초 개구부 주변 변형은 7번째 사이클 정 방향 가력 중 변위와 하중이 각각 36.54mm, 8.2tf일 때 발생하였다. 최초 부재균열은 7번째 사이클 부 방향 가력완료 시점에서 변위와 하중이 각각 40.00mm, 9.1tf일 때 발생하였고 이는 최대하중의 100%범위이다.

4. 분석 및 고찰

4.1 개구부 형태별 고찰

4.1.1 Depth Critical Case

층이 최대인 개구부를 갖는 실험체는 개구부가 한 개인 실험체가 개구부가 두 개인 실험체에 비해 최대내력이 큰 경향을 보였다. 또한, 개구부 한 개인 실험체 중 RDS-1 실험체의 최대내력이 RDS-2 실험체의 최대내력보다 크게 나타났다. 30mm 변위까지 살펴보면 RDD 실험체의 내력이 개구부 한 개인 실험체 중 RDS-2 실험체의 내력 보다 큰 것을 알 수 있다.

이는 개구부가 한 개인 실험체의 내력이 비교적 일정한 증가율을 보이는 것에 비하여 개구부가 두 개인 실험체의 내력 증가율이 20mm 변위 이후 큰 폭으로 감소하고 있기 때문이다. 즉, RDS-2 실험체와 RDD 실험체는 10mm 변위 가력 완료시 하중과 20mm 변위 가력 완료시 하중의 증가율이

유사한 경향을 보이거나 20mm 변위 가력 완료시 하중 이후 내력 증가율을 살펴보면 RDD 실험체의 내력 증가율이 감소하는 양상을 보인다.

이는 같은 형태 개구부일 때 개구부가 복수일 경우 개구부 간의 상호 작용에 의한 영향으로 개구부가 한 개인 실험체에 비하여 내력 증가율이 감소하는 것이라고 사료된다. 또한 개구부가 한 개인 실험체의 경우 M/V값이 상대적으로 작은 실험체가 M/V값이 상대적으로 큰 실험체에 비하여 내력 증가율의 감소가 더 큰 것으로 나타났다.

4.1.2 Length Critical Case

길이가 최대인 개구부를 갖는 실험체는 최대내력의 경우 개구부가 두 개인 실험체가 개구부가 한 개인 실험체에 비해 큰 경향을 보였다. 그러나 개구부가 한 개인 실험체군의 경우 실험 도중 개구부 주변의 변형발생에 따른 부재 국부좌굴이나 균열이 발생하기 이전에 용접부에서 파괴가 발생하여 개구부가 실험체 내력에 미치는 영향에 대하여 판단하기에 난점이 있다. 개구부가 한 개인 실험체들은 비슷한 내력 값을 보이고 있으며 용접부파괴 시점까지 RLS-2 실험체의 최대내력이 RLS-1 실험체의 최대내력보다 크게 나타났다. 또한 용접부파괴 시점까지 개구부 한 개인 실험체의 내력 증가율이 유사한 경향을 보이고 있으나 RLS-2 실험체에 비하여 RLS-1 실험체는 변위가 증가할수록 내력 증가율이 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉, 개구부 한 개인 실험체들은 40mm 변위 가력완료 시까지 유사한 내력과 내력 증가율을 나타내고 있으나 40mm 변위 가력완료시 하중과 50mm 변위 가력완료시 하중의 증가율에 있어 RLS-2 실험체의 내력 증가율이 RLS-1 실험체의 내력 증가율보다 높게 나타나고 있다. 이는 개구부의 위치와 하중 재하점 사이 거리의 영향으로 M/V값이 상대적으로 작은 실험체일수록 내력 증가율이 감소하는 것으로 사료된다.

개구부 한 개인 실험체와 비교할 때 개구부 두 개인 실험체는 더욱 큰 폭으로 내력 증가율이

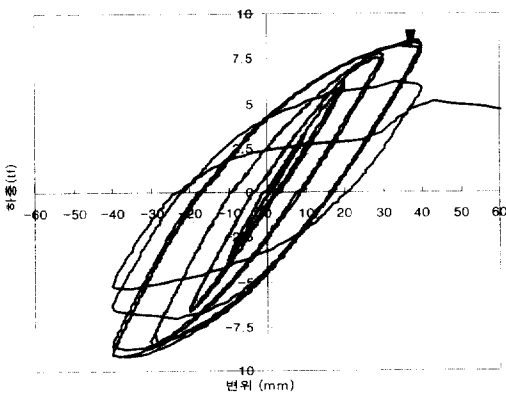


그림 13. RND 하중-변위 곡선

감소하고 있다. 즉, 개구부가 한 개인 실험체의 M/V값과 무관하게 개구부 두 개인 실험체가 개구부 한 개인 실험체에 비해 내력 증가율이 크게 감소하고 있다. 이는 같은 형태 개구부일 때 개구부가 복수일 경우 개구부 간의 상호 작용에 의한 영향 때문인 것으로 사료된다.

4.1.3 Normal Case

보통 개구부를 갖는 실험체는 최대내력의 경우 개구부가 한 개인 실험체가 개구부가 두 개인 실험체에 비해 큰 경향을 보였다. 또한, 개구부 한 개인 실험체 중 RNS-1 실험체의 최대내력이 RNS-2실험체의 최대 내력보다 크게 나타났다. RNS-1실험체는 실험 중 지점 용접부가 파괴된 실험체로 파괴 시 내력이 RNS-2실험체의 최대 내력보다 컸다. 30mm 변위까지의 경향을 살펴보면 RND실험체의 내력이 개구부 한 개인 실험체군의 내력보다 크나 40mm 변위 시 내력은 개구부 한 개인 실험체군의 내력보다 작은 것을 알 수 있다. 이는 개구부가 한 개인 실험체의 내력이 40mm 변위까지 비교적 일정한 증가율을 보이는 것에 비하여 개구부가 두 개인 실험체의 내력 증가율이 서서히 감소하여 30mm 변위 이후 큰 폭으로 감소하고 있기 때문이다. 이는 같은 형태 개구부일 때 개구부가 복수일 경우 개구부 간의 상호 작용에 의한 영향으로 개구부가 한 개인 실험체군에 비하여 내력증가율이 감소하는 것이라고 사료된다. RND 실험체는 40mm 변위에서 부재균열이 발생하여 이후 내력감소가 발생하였다. 따라서 RND 실험체는 개구부 한 개인 실험체군에 비해 내력 증가율 뿐 아니라 최대내력 및 하중재하능력에서 뒤떨어지고 있음을 알 수 있다.

개구부가 한 개인 실험체의 경우 M/V값이 상대적으로 큰 실험체가 M/V값이 상대적으로 작은 실험체에 비하여 내력 증가율의 감소가 더 큰 것으로 나타났다. 즉, 개구부가 한 개인 실험체 중 RNS-2 실험체는 40mm 변위까지 내력의 증가율에 있어 RNS-1 실험체와 비슷한 경향을 보이지

만 50mm 변위 재하 시 부재균열이 발생하여 최대내력에 도달하여 40mm 변위 가력 완료 이후 내력 증가율이 감소하고 있다. 이는 depth critical이나 normal case와는 다른 양상으로 이는 개구부의 위치와 하중 재하점 사이 거리의 영향이외에도 개구부 형상, 지점에서 개구부 끝단까지의 거리 및 재하점에서 개구부 끝단까지의 거리등의 복합적인 영향에 의한 것으로 사료된다.

4.2 개구부 위치 및 개수 별 고찰

4.2.1 개구부가 한 개인 실험체 (M/V=330)

M/V값이 330인 실험체군의 내력증가를 살펴보면 초기내력은 depth critical, normal, length critical case의 순서로 크고 내력증가율은 비슷한 경향을 보인다. 그러나 변위가 증가할수록 depth critical case의 내력증가율이 감소하는 경향이 length critical이나 normal case에 비해 크게 나타났다. 최대내력은 normal, length critical, depth critical case의 순서로 나타났다. Length critical case는 내력증가율의 감소가 나머지 두 실험체에 비해 적어 실험체군 중 가장 안정적으로 내력을 확보하고 있다. Normal case는 실험체 중 최대내력을 가지며 내력증가율의 변화도 작은 경향을 보였다.

4.2.2 개구부가 한 개인 실험체 (M/V=670)

M/V값이 670인 실험체군의 내력증가를 살펴보면 초기에 내력은 비슷하나 내력증가율은 normal, length critical, depth critical case의 순서로 크다. 그러나 변위가 증가할수록 depth critical 과 length critical case의 내력증가율이 감소하는 경향이 normal case에 비해 크게 나타났다. 최대내력은 length critical, normal, depth critical case의 순서로 나타났다. Length critical case는 normal case에 비해 내력증가율의 감소는 컸으나 실험체에 균열이나 국부좌굴이 발생하기 이전 나머지 두 실험체에 비해 큰 내력을

확보하고 있어 가장 안정적으로 내력을 확보하고 있다.

4.2.3 개구부가 두 개인 실험체

개구부가 두 개인 실험체군의 내력증가를 살펴 보면 초기에 내력과 내력증가율은 공통적으로 depth critical case가 가장 작고 length critical과 normal case는 비슷한 경향을 보였다. 변위가 증가할수록 depth critical case의 내력증가율이 감소하는 경향이 length critical이나 normal case에 비해 크게 나타났고 normal case의 내력증가율이 length critical case보다 크게 감소하고 있다. 세 실험체가 공통적으로 내력증가율이 감소하고 있으며 length critical case는 실험체군 중 최대내력을 가지며 가장 안정적으로 내력을 확보하고 있다.

4.3 내력 및 강성

4.3.1 내력 및 내력 저하

그림 14는 개구부 주위의 균열발생 이후의 내력(그림 5-13 참조) 저하를 나타낸다.

전체 실험체의 최대내력을 살펴보면 depth critical case 실험체군이 가장 작고 length critical과 normal case는 비슷한 경향을 보였다. Depth critical case 중에서는 RDS-1실험체, RDS-2 실험체, RDD실험체의 순서로 최대내력이 컸다.

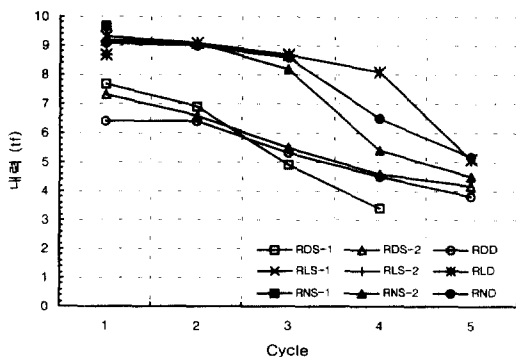


그림 14. 내력 저하

Length critical case 중에서는 RLD실험체의 최대내력이 가장 컸고, RLS-1실험체와 RLS-2 실험체의 최대내력은 비슷하였다. Normal case 중에서는 RNS-1실험체의 내력이 가장 컸고 RNS-2 실험체와 RND실험체의 내력이 비슷하였다. 개구부가 두개인 실험체에서는 length critical, normal, depth critical case의 순서로 내력이 컸다.

웹 개구부 주변 균열 발생 이후 다섯 사이클 반복 재하 후 각 실험체의 내력은 최대내력의 50% 정도로 감소하는 모습을 보이고 있다. 따라서 지진하중과 같은 반복하중을 받을 경우 소요 내력을 확보하는 데 어려움이 있을 것으로 사료된다.

4.3.2 강성 및 강성 저하

그림 15는 하중-변위곡선에서의 강성과 강성저하를 나타낸 것이다.

각 실험체에서 균열발생 이후 다섯 사이클 반복 재하 시 강성은 최대내력의 감소와 비슷한 양상을 보였으며, 최대강성의 50% 정도로 감소하는 모습을 보이고 있다.

4.4 Darwin 제안식과의 비교

4.4.1 Depth Critical Case

Depth critical 실험체의 경우, Darwin 제안식에 의한 내력한계값(ϕV_m)은 실험결과의 39~52%를 나타내어 Darwin의 제안식이 매우 큰

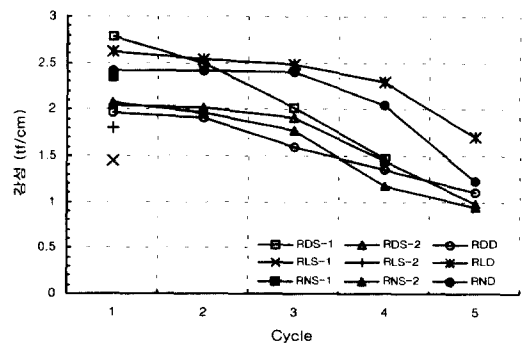


그림 15. 강성 저하

안전율을 적용하고 있음을 알 수 있다.

4.4.2 Length Critical Case

Length critical 실험체의 경우, Darwin의 제안식에 의한 내력한계값은 실험결과의 84~98%를 나타내었다. 따라서 Length critical의 경우, Darwin의 제안식이 안전율을 많이 두고 있지 않음을 알 수 있다. 또한 개구부가 복수일 경우 제안식에 의한 한계내력은 상대적으로 모멘트가 큰 개구부가 더 작게 된다.

4.4.3 Normal Case

Normal case 실험체의 경우 Darwin의 제안식에 의한 내력한계값은 실험결과의 74~81%를 나타내어, Darwin의 제안식에 의한 한계 내력은 춤이나 길이가 큰 개구부의 사이 범위인 안전율을 두고 있음을 알 수 있다.

4.5 제안식에 의한 실험결과 검토

그림 16에 실험 결과를 Darwin이 제안한 $M-V$ 상관도에 표시하였다.

설계휨강도(ϕM_n)와 설계전단강도(ϕV_n) 간의 상관관계식은 그림 16의 실선으로 다음의 식으로

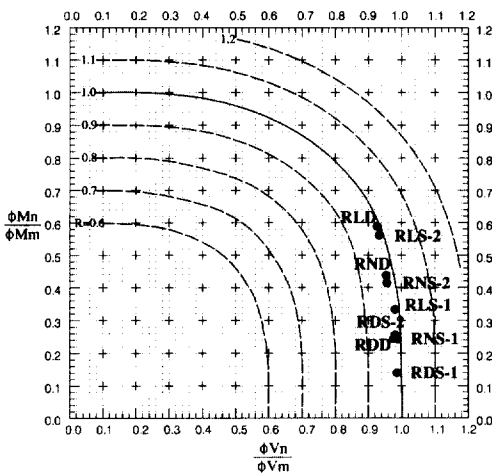


그림 16. Darwin 제안식의 한계 내력 검토

나타낸다.

$$\left(\frac{M_u}{\phi M_n}\right)^3 + \left(\frac{V_u}{\phi V_n}\right)^3 = R^3$$

여기서, $R = V_u/\phi V_n = M_u/\phi M_n$ 이다. 위의 식에 대하여 본 연구의 실험결과는 안전측인 $R=1$ 인 범위 안에 들고 있어 Darwin의 제안식을 만족하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

반복하중을 받는 유공 H-형강 보의 소성거동 실험을 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 춤이 최대인 개구부를 갖는 실험체(RDS, RDD 실험체)의 최대내력은 실험체 중 가장 작았다. 또한, 부재 국부좌굴이나 균열 발생 후 내력이 급격하게 저하하는 양상을 보여, 개구부 춤을 늘릴 경우 적절한 보강을 고려해야 한다.
- (2) 개구부 개수를 증가시키는 것은 부재내력 확보에 불리하다. 각 개구부 형태의 실험체를 비교할 때 개구부가 두 개인 실험체는 개구부가 한 개인 실험체에 비해 내력 증가율이 크게 감소하는 모습을 나타내었고 최대내력도 낮은 양상을 보였다. 개구부가 복수일 경우, 개구부 사이의 충분한 간격 유지와 보강재의 사용을 검토해야 한다.
- (3) 개구부가 두 개인 유공보의 경우 Darwin의 제안식에 의한 최소거리 규정은 적절한 것으로 판단된다. 개구부가 두 개인 실험체의 파괴 모드로 볼 때 복수 개구부의 상호 작용에 의한 영향은 미비한 것으로 나타났다.
- (4) 실험체에서 국부좌굴이나 균열 발생 후 다섯 사이클 가력 후 내력은 각 실험체 최대내력의 50% 내외로 감소하는 양상을 보였다. 이것은 일반 H-형강 보의 국부좌굴 후

내력 저하에 비해 매우 급격한 것이다. 따라서, 지진하중과 같은 반복 하중에 대하여 폭-두께비에 대한 고려나 보강재의 사용 등이 검토되어야 한다.

- (5) Darwin의 제안식은 탄성 구간 내에서 비교적 안전한 유공보 설계를 유도하고 있다. 길이가 최대인 개구부와 보통 개구부를 갖는 실험체에서 Darwin의 제안식에 의한 부재내력은 부재 탄성한계에 대하여 적절한 안전율을 확보하고 있다. 그러나 춤이 최대인 개구부를 갖는 실험체와 모멘트의 영향에 대해서는 과도한 안전율을 제시하고 있다.

본 연구에서는 국내에서 생산되는 H-형강을 대상으로 개구부 형태, 개구부 위치, 개구부 개수 및 간격에 대하여 반복하중 하에서 유공보의 소성거동을 관찰하고 각 변수의 영향을 평가하였다. 본 연구에 이어 유공보 내력에 영향을 미치는 한계 개구부 춤-길이 비, 개구부 간격 및 개구부 보강에 대한 연구가 필요하며 소성영역에서 유공보의 내력 및 거동을 고려한 설계식에 대한 연구가 이루어져야 한다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2001학년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것입니다. 연구비지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김덕재, 이은택, 『강구조 이론과 한계상태 설계』, 기문당, 2000.
2. 김규석, 김종락, "유공 H형강보의 강성에 관한 연구", 대한건축학회지 24권, 92호, 57-61, 1980. 2.
3. 이승준, 김원기, 정이근, "상부유공 합성보의 극한 내력", 대한건축학회 논문집 11권 6호, 137-144, 1995. 6.
4. Bower, John E., "Design of Beams with Web Openings", ASCE Journal of the Structural Division Vol. 94, No. ST3, 783-807, March, 1968.
5. Cooper, Peter B., and Snell, Robert R., "Tests on Beams with Reinforced Web Openings", ASCE Journal of the Structural Division, Vol.98, No. ST3, 611-632, March 1972.
6. Darwin, David, "Steel and Composite Beams with Web Openings/ Steel Design Guide Series 2", AISC, Inc., 1-63, 1990
7. Dougherty, Brian K., "Buckling of Web Posts in Perforated Beams", ASCE Journal of the Structural Division Vol. 107, No. ST3, 507-519, March 1981
8. Frost, Ronald W., and Leffler, Robert E., "Fatigue Tests of Beams with Rectangular Web Holes", ASCE Journal of the Structural Division Vol. 97, No. ST2, 509-527, February 1971.
9. Redwood, Richard G. and McCutcheon, J. O., "Beam Tests with Unreinforced Web Openings", ASCE Journal of the Structural Division Vol. 94, No. ST1, 1-17, January 1968.
10. Redwood, R. G., "Plastic Behavior and Design of Beams with Web Openings", Proceedings, First Canada Structural Engineering Conference (Toronto: Canadian Steel Industries Construction Council), 127-138, Feb., 1968.
11. Redwood, R. G., "Tables for Plastic Design of Beams with Rectangular Holes", AISC Engineering Journal Vol. 9, No.1, 2-19, 1972.
12. Redwood, R. G. and Minoru Uenoya, "Critical Loads for Webs with Holes", ASCE Journal of the Structural Division Vol. 105, No. ST10, 2053-2067, October 1979.
13. Segner, E. P., "Reinforced Requirements for Girder Web Openings", ASCE Journal of the Structural Division Vol. 90, No. ST6, 147-164, June 1964.

(접수일자 : 2001년 9월 21일)