

반복하중을 받는 H형강 유공보의 소성 및 국부좌굴 거동

Inelastic and Local Buckling Behavior of H-Beams with Web Opening under Cyclic Loadings

이 은 택¹⁾ · 김 철 환²⁾ · 오 우 훈³⁾

Lee, Eun Taek · Kim, Cheol Hwan · Oh, Woo Hun

요 약 : 유공부재의 탄성 및 비탄성 거동을 나타내기 위하여 많은 연구가 이루어져왔으나 단축하중상태의 연구에 집중되어있는 실정이다. 또한, 국부좌굴을 고려한 유공보 설계에 대한 식들은 일반적으로 Darwin의 연구결과를 토대로 하여 사용되고 있으나, 그 연구결과가 단조하중에 집중되어있어 반복하중과 국부좌굴을 고려한 연구의 필요성이 제기되었다. 따라서, 본 연구에서는 반복하중상태에서의 7개의 원형유공보에 대한 실험이 행해졌다. 실험체의 형상 및 변수는 Darwin에 의해 제안된 설계과정에 기초를 두었다. 본 실험을 통하여, 기존 설계식의 타당성, 소성현지의 영향, 유공 부분의 반복국부좌굴의 영향 등이 관찰·연구되었다.

ABSTRACT : Many researches have been conducted to describe the elastic and inelastic behavior of H-shaped beams with web openings, and were generally concentrated on the uniaxial loading conditions. With previous research results, the formulae for the design of beams with web openings, considering local buckling, have been proposed by Darwin. Although the formulae are so simple and useful to apply to real situations, it needs more research on cyclic loading conditions.

In this experimental study, a total of seven H-shaped beams with circular web openings under cyclic loading conditions were investigated. The dimension criteria were based on the formulae proposed by Darwin. The suitability of the existing design formulae, the effects of plastic hinges on beams with web openings, and the local buckling around the web openings to the beam strength under cyclic loading were also investigated through by the observations of the behavior of these beams with various dimensional openings.

핵심용어 : 개구부, 소성거동, 반복하중, 국부좌굴, 내력저하, 강성저하

KEYWORDS : Web opening, inelastic behavior, cyclic loading, local buckling, strength deterioration, stiffness deterioration

1. 서론

건축물이 고층화 대형화되어감에 따라서 고층건물은 부재 단면의 감소와 공기 단축 등 여러 가지 장점 때문에 철골구조로 건설되고 있다. 또한 최근에는 설비의 고도화 추세로 공조 배관 등 설비에 필요한 층간 공간이 증가하는 추세이다. 이 때문에 우리나라에서도 보에 개구부를 형성하는 유공보 시스템이 도입되어 사용되어지고 있다. 그러나 현재 유공보에 대한 특별한 지침이 마련되어 있지 않은 상태이며 실험에 의한 규명 없이 구조설계자의 경험에 의존, 현장에서는 무조건적으로

스티프너로 보강하여 설계하고 있는 실정이다. 특히 반복하중을 받는 유공보의 경우에 대해서는 그리 많은 연구가 수행되지 않아, 지진하중과 같은 반복하중을 받는 구조물에 대한 연구가 미흡한 상태에서 유공보 설계가 이루어지고 있어 반복하중을 받는 유공보에 대한 연구는 필수적이다.

유공보에 관한 국외 연구는 Segner(1964)의 유공보에 요구되는 보강량에 관한 연구가 최초로 수행되었으며 Bower(1968)는 보강되지 않은 직사각형 개구부를 갖는 유공보 실험을 통해 소성 거동과 극한 강도를 예측하는 문제를 연구 발표하는 등 유공보와 관련하여 많은 연구를 수행하였다.

1) 정회원, 중앙대학교 건축학부 조교수
(Tel. 02-820-5340, Fax. 02-812-4150, E-mail:etlee@cau.ac.kr)
2) 정회원 상주대학교 건축공학부 조교수(chkim@sangju.ac.kr)
3) 정회원, 중앙대학교 대학원 졸업(sonne77@hanmail.net)

본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

Frost(1971)는 반복하중을 받는 개구부의 피로 현상에 대해 연구하였다. 또한 Redwood(1978, 1979)는 얇은 웹브에 무편심 개구부를 갖는 보에 대하여 웹브포스트의 좌굴에 대한 문제를 연구하였고 유공보의 임계하중에 대한 연구를 수행하였다. 이후 Darwin(1990)에 의한 유공보 설계기준식이 AISC Steel Design Guide로 발행되었다. 우리나라에서는 김종락(1978)의 연구를 시작으로 김규석·김종락(1980)이 무보강 유공보에 관한 연구를 수행하였다. 최근 이승준·김원기·정이근(1995)에 의해 유공 합성보의 극한내력에 대한 연구가 수행되었고 반복하중에 받는 달걀형 개구부를 가진 유공 합성보의 거동에 대한 연구가 수행되었다(박노웅·김원기, 1999).

따라서 본 연구는 현재까지 국내·외에서 수행된 유공보 관련 자료를 참고로 하여 Darwin 규정식에 의한 원형 개구부 유공보와 규정치를 벗어나게 하여 보강재로 보강한 시험체를 제작, 반복하중을 받을 때 소성영역에서의 거동과 국부 좌굴 양상을 관찰하고, 그에 따른 부재의 최대 내력, 개구부 주변의 균열발생, 내력저하, 파괴 양상 등 구조적 거동을 연구함으로써 국내 유공보설계의 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 실험계획

2.1 실험체 설계

실험체는 현재 동부제강(주)에서 생산되고 있는 H-200×100×3.2×4.5 ($F_y = 2.4tf/cm^2$, SS400) 용접형강을 사용하였으며, 개구부의 설계는 Darwin의 규정식을 토대로 보춤의 60%인 12cm를 개구부의 직경으로 하였고, 규정에서 벗어나는 직경의 사이즈는 규정보다 10%가 높은 16cm로 하였다. 단부에 개구부를 설치한 경우, 개구부의 위치는 단부에서 개구부 중심까지의 거리를 24cm로 하였다. 개구부의 위치, 보강재의 유·무 등의 기준으로 다음과 같이 7개의 변수로 실험하였다. <그림 1 및 표 1 참조>

- 1) 무공보
- 2) 규정내의 개구부가 중앙에 위치한 비보강 유공보
- 3) 규정내의 개구부가 중앙에 위치한 보강 유공보
- 4) 규정내의 개구부가 단부에 위치한 비보강 유공보
- 5) 규정내의 개구부가 단부에 위치한 보강 유공보
- 6) 규정치를 벗어난 개구부가 중앙에 위치한 비보강유공보
- 7) 규정치를 벗어난 개구부가 중앙에 위치한 보강 유공보

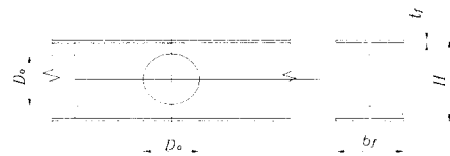
표 1. 실험체 일람

실험체명	F_y	d	b_f	t_w	t_f	L	D_0	A_r	M/V
1) SOL							-	-	-
2) CCN-120	2.4	200	100	3.2	4.5	1000	120	-	500
3) CCS-120								11.2	
4) CEN-120								-	
5) CES-120							11.2	200	
6) CCN-160							-		
7) CCS-160							11.2		500

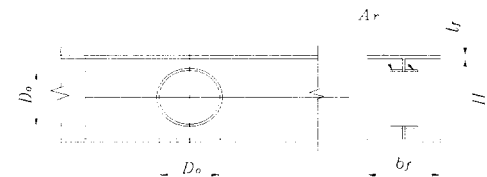
단위 - F_y (tf/cm²), A_r (cm²), 치수(mm)

CCN - 120

- ||| L 개구부 크기
- || L 보강재 유무 (N : 보강하지 않음, S : 보강)
- | L 개구부 위치 (C : 중앙, E : 단부)
- L L 개구부 형상 (C : 원형)



(a) 비보강 개구부와 단면



(b) 보강 개구부와 단면

그림 1. 개구부 각부명칭 일람

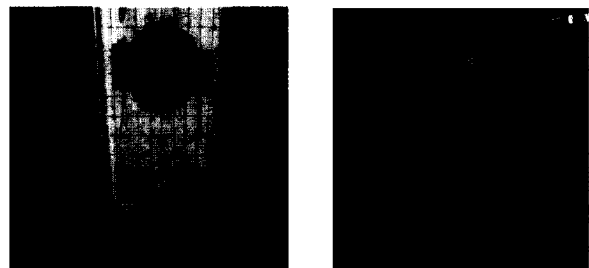


그림 2. 개구부 위치와 보강재의 형상

2.2 실험 방법

실험체의 가력장치는 그림 2와 같으며 스트롱 프레임에 고력볼트로 접합하였다. 접합부에서 100cm 떨어진 위치에 300mm까지 변위측정 가능한 LVDT를 설치하여 하중을 받는 자유단에서의 변위를 측정하였고, 실험체의 개구부 중심선상의 좌우측, 보강재, 플랜지 등에 스트레인 게이지를 부착하여 변형도를 측정하였다. 모든 실험체는 최초 0.5tf 가력시까지 정·부방향으로 2 사이클을 가력하였다. 이 두 번의 반복 가력 동안 고정단에 설치한 스트레인 게이지의 변위값을 통하여 이론치와 비교하는 과정을 거쳤으며 측정장치 및 실험체 설치 상태의 안정성을 검토하였다.

단면치수를 고려, 부재가 최초로 항복하는 하중을 산정한 후 각 실험체별로 이점에서의 변위를 δ_0 로 하였다. 국부좌굴 발생으로 인한 내력저하 시점을 보다 정확하여 발견하기 위해 변위제어 방식을 택하였다. 각 실험체에서 δ_0 가 결정되면 이후 $2\delta_0$, $3\delta_0$, $4\delta_0$...의 정수배로 변위를 증가시켜 반복 가력하였다.

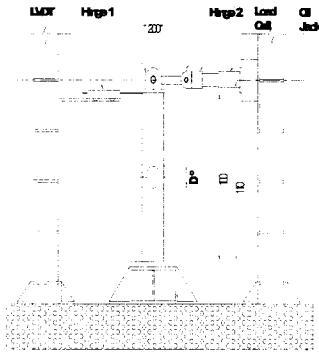


그림 3. 실험체 가력장치

3. 실험결과 및 분석

3.1 사용재료의 역학적 성질

실험에서 사용된 SS400강재를 각각 웹과 플랜지에서 2개씩 절편하여 KSB 0801의 금속재료 인장시험 규정에 따라 제작, 실험하였다.

측정된 시험편의 강도는 각각 2개의 값을 평균으로 하여 항복응력과 최대응력, 연신률 등을 표 2에 나타내었고, 응력-변형률 관계를 그림 4에 나타내었다. 모든 시험편의 항복강도는

설계기준강도 2.4tf/cm²를 상회하고 있으며 비교적 명확한 항복현상을 나타내고 있다.

표 2. SS400강재의 재료특성

시험편	σ_y (tonf/cm ²)	E (tonf/cm ²)	σ_u (tonf/cm ²)	항복비 (σ_y/σ_t)	연신율 (%)
Flange	3.94	2085	4.85	81	35
Web	3.44	2019	4.59	75	31

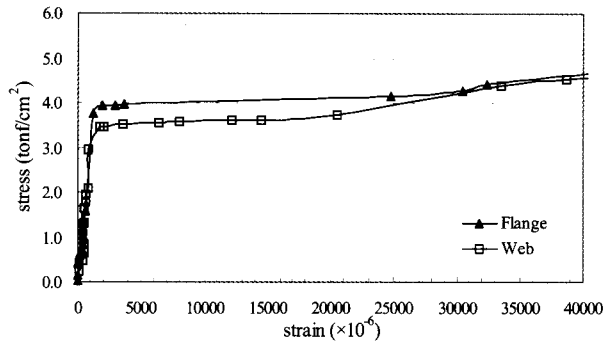


그림 4. 재료의 응력-변형률 관계

3.2 유공부재의 국부좌굴 양상

본 실험에서 소성힌지와 국부좌굴의 발생위치는 개구부에 발생한 것과 단부에 발생한 것 두 가지의 형태로 발생하였다. 좌굴의 형태는 플랜지에 국부좌굴이 발생한 뒤 반복가력 회수가 증가하면서 웹으로 진전되는 형태였다. 최초 국부좌굴이 플랜지에 발생한 변위는 탄성한계의 변위에서 약 1.5~2배의 범위에서 발생하였다.

SOL 실험체는 개구부가 없는 무공보로서 일반적인 캔틸레버보의 거동을 나타내었다. 국부좌굴은 최대모멘트를 받는 압축 측 플랜지의 고정단에서 6cm정도 위쪽에서 발생하였다. 그리고 이 시점 이후 반복회수를 늘려감에 따라 점점 웹에 좌굴이 확인해지면서 점점 그 정도가 증가하였고, 내력도 감소하였다. 그러나 특이한 것은 좌굴이 확인해지기 전까지는 강도가 증가하다가 눈에 보일 정도로 증가할 시점부터 내력이 감소해 가는 것이 관찰되었다.

CEN-120 실험체에서는 개구부 하단의 압축 측 플랜지에 좌굴이 발생하였다. 이후 반복가력 횟수를 증가시켜감에 따라 플랜지의 국부좌굴이 점점 커져갔으며, $4\delta_0$ 첫 번째 사이클 2.6tf, 24.98mm에서 개구부 주변에 웹 부분에 좌굴이 발생하였다. 이후 반복 가력을 할수록 플랜지 및 웹의 국부좌굴의 정도가 점점 심해졌다. 좌굴 발생 시점부터 내력은 점점 감소하였다.

CCS-160 실험체의 경우, $3\delta_0$ 3번째 사이클 정방향

3.05tf, 11.9mm 가력 시 압축 측 플랜지의 고정단에서 약 6~9cm 범위에서 국부좌굴이 발생하였다. 이후 후방향 가력시 반대쪽 플랜지에도 국부좌굴이 눈에 띄게 발생하였으나 웨브에는 국부좌굴이 발생하지 않았다.

CCN-120 실험체의 경우, 개구부 중심선에서 좌·우측 모두 자유단 쪽으로 15. 올라간 위치에 석고로 칠한 부분의 균열이 최초로 발생하였다. 그러나 이후 15. 에서 약 40. 까지만 확대되었을 뿐 별다른 변화가 생기지 않았다. 이후 4 δ_0 첫 번째 사이클 정방향가력(4.1tf, 21.1mm)에서 플랜지측의 국부좌굴이 커졌으며 웨브로 좌굴이 진전되었다. 두 번째 사이클 완료 시 웨브의 국부좌굴이 확대되어갔다.

CCS-120 실험체에서는 압축 플랜지에 단부쪽에서 약 6cm 떨어진 지점에서부터 석고로 페인팅한 부분이 벗겨지기 시작하여 압축 플랜지 쪽에 약간의 국부좌굴이 발생하였다. 여기서 국부좌굴이 처음 발생한 위치가 서로 대각방향을 취하고 있다.

CES-120 실험체의 경우, 압축 플랜지의 단부로부터 약 3cm 떨어진 곳에서 국부좌굴이 발생하여 웨브로 좌굴이 진전되었다. 이후 반복 가력 회수를 늘려감에 따라 점점 좌굴의 정도가 심해졌다. 아울러 4 δ_0 네 번째 사이클 후방향 가력 완료 시(2.7tf, 26.13mm) 압축 플랜지와 웨브를 용접한 곳이 일어나는 현상이 나타나 하중전달의 정도가 서로 상이하여 발생한 것으로 보인다. 전체적인 국부좌굴의 양상으로 CCN-160, CEN-120의 국부좌굴이 개구부에서 생겼다(그림 6(a) 참조). CCS-160, CCN-120, CCS-120, CES-120이 SOL와 마찬가지로 최대모멘트를 받는 고정단 부근에서 국부좌굴이 발생하였다(그림 6(b) 참조).

그림 5는 각 실험체별로 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 여기서 '■' 표시는 최초의 플랜지 국부좌굴 시점을 나타내는 것이다. 원형 개구부의 유공보에 있어서 사각형 개구부의 유공보(이원석, 2001; 이용제, 2001)와 비교하여 볼 때 가장 큰 차이점으로 개구부 주변에 크랙이 발생하지 않았고, 사각형 개구부를 갖는 실험체의 경우보다 Darwin(1990)의 제한치 이내의 경우에 있어서 내력이 더 높았다.

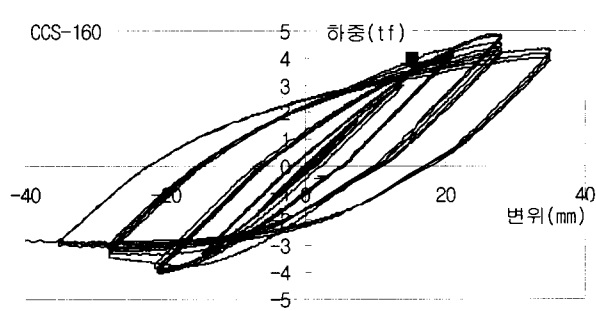
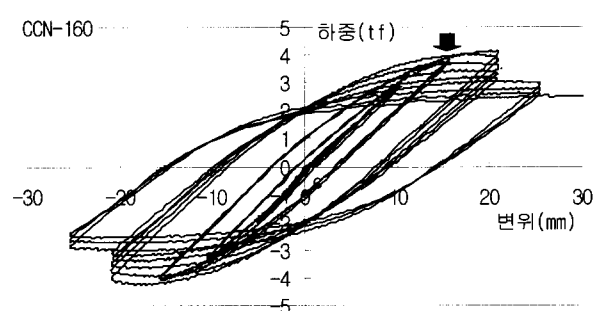
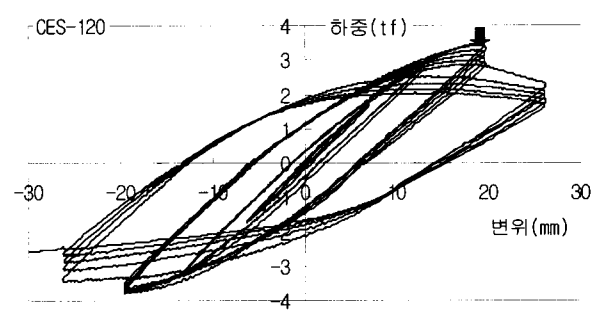
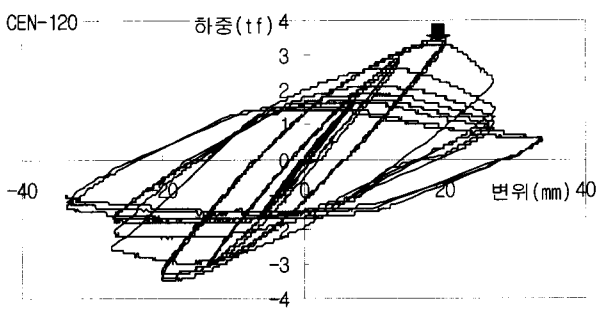
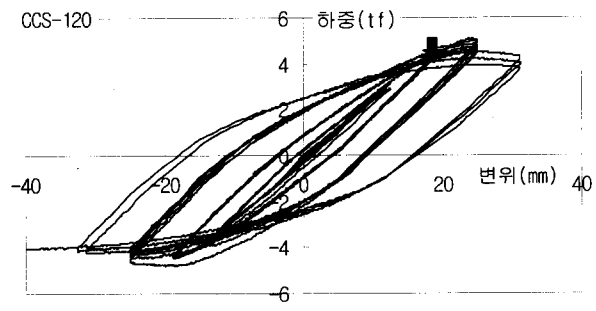
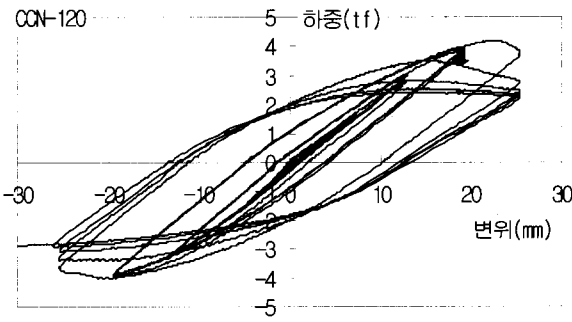
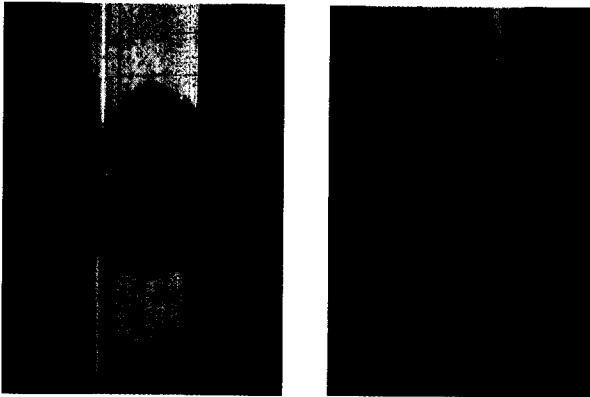


그림 5. 각 실험체별 하중-변위 곡선



(a) 개구부의 좌굴 발생

(b) 단부에 좌굴 발생

그림 6. 유공부재의 국부좌굴 양상

3.3 실험체별 초기강성 비교

무공보인 SOL 실험체의 초기강성은 0.26tf/mm였다. 다른 실험체의 초기 강성 중 최대는 CCN-160의 1.12tf/mm이었고 실험체의 초기강성은 평균적으로 0.25~29tf/mm을 유지하였으나 CCS-160의 경우 최소강성인 0.23tf/mm을 가졌다.

그러나 위 값들에서 알 수 있듯이 최소강성과 평균의 값과의 차이가 별로 보이지 않았으나 최대강성과는 0.83tf/mm의 차이를 보였다.

3.4 내력저하

내력저하의 양상은, 실험체 별로 다소 차이는 있으나 최초 플랜지의 국부좌굴 발생 시에는 내력저하가 발생하지 않았으나, 웨브로 국부좌굴이 진전된 이후에는 내력저하의 양상이 나타났다. 또한, 단부에 국부좌굴이 발생한 실험체의 경우 내력이나 내력변화율이 정방향 가력 시와 부방향 가력 시의 차이가 크게 나타나는 것은 휨모멘트를 가장 많이 받는 고정 단부에서의 국부좌굴의 발생에 의해 LVDT의 위치가 국부좌굴 발생 이후 옮겨져 대칭성을 상실했기 때문이다.

모든 실험체의 최대내력과 실험종료시의 내력의 저하율은 약 30%~40%로 응력집중의 차이와 단면결손의 차이로 사각형 개구부를 갖는 유공보에 비해 그 저하율이 적었음을 본 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 그러나 휨 모멘트를 많이 받는 단부에 개구부가 위치했을 경우에는 약 50%~60%의 내력저하율을 보여 사각형 개구부(이원석, 2001; 이용제, 2001)를 갖는 유공보의 경우와 비슷한 내력저하율을 나타내었다.

따라서 원형 개구부를 갖는 유공보의 경우 그 내력저하율이 사각형 개구부를 갖는 유공보의 경우보다 적으며, 최대내력도 더 높음을 알 수 있다.

각 실험체별 내력저하를 살펴보면, SOL 실험체의 경우 일반 형강으로서 최대 내력점 이후 매 cycle 별로 2~8%의 내력저하를 보여 그리 큰 내력저하율을 보이지 않았으나 웨브로 좌굴이 진전되기 이전에 오히려 내력이 약 3% 증가한 것으로 나타났다.

CCN-120의 내력저하의 양상은 최초 국부좌굴의 발생은 3 δ_0 첫 번째 가력 중 발생하였으며, 웨브로 좌굴이 진전된 시점에서 내력저하의 양상이 두드러졌다. 웨브로 좌굴이 진전된 후에는 15%로 급속히 내력의 감소를 보였으며 이후 7~8%의 꾸준한 내력감소를 보이다가 최종 실험 종료 시에는 최대내력과 약 40%의 내력 감소를 나타내었다.

CCS-120 실험체의 내력저하의 양상은 최대내력 이후 매 cycle별 2~3%의 꾸준한 내력저하가 발생하여 실험 종료시의 내력저하율이 10%로 나타났다. 이 내력저하율은 개구부가 없는 일반형강과 비슷한 내력저하율을 보였다.

CEN-120 실험체의 경우 최초 플랜지 국부좌굴 발생이후 내력은 6%의 감소를 보였다. 그러나 웨브에까지 국부좌굴이 진전된 이후는 이전 cycle의 내력에 비해 약 34%의 감소를 보였다. 이후 실험 종료 시까지 6~10%로 꾸준히 내력이 감소하여 실험 종료 시에는 최대내력과 비교해볼 때 70%에 가까운 큰 내력 감소율을 보였다. 국부좌굴의 발생위치는 휨모멘트를 받는 단부가 아니라 개구부 주변에 발생하였다. 그리고 다른 실험체와 비교하였을 때 가장 낮은 최대내력값을 가졌고, 내력감소율 또한 가장 컸다.

CES-120 실험체의 내력저하의 양상은 최초 플랜지 국부좌굴 발생이후 5~7%의 내력 감소율을 꾸준히 보였다. 그러나 웨브로 좌굴이 진전된 이후로는 20% 가까이 내력이 더 감소하였으며, 최대내력과는 30%의 내력감소율을 보였다. 이후 반복가력을 할수록 이전 cycle보다 7%의 내력감소를 꾸준히 보이다 실험종료시의 내력은 최대내력에 50%의 감소율을 보였다. 보강재로 보강을 하였을 때는 최대내력이 증가하였고, 내력의 감소율도 더 감소하였으며, 국부좌굴의 발생위치도 개구부에서 일반형강과 같은 단부에 발생하여 보강효과가 있음을 확인할 수 있으나 그 정도는 그리 크지 않았다.

실험체 CCN-160은 최초 플랜지 국부좌굴이 발생하고, 심화되어 웨브로 진전되기 전 즉, 4 δ_0 의 첫 번째 cycle에서 4 δ_0 의 두 번째 cycle의 내력이 (5th(1)에서 5th(2)) 5%로 내력의 감소를 보였으며, 웨브로 좌굴이 진전된 이후 7~15%의 내력의 감소를 보였다. 이후 실험 종료 시에는 36%의 내력 감소를 보였다.

마지막으로 CCS-160 실험체의 내력저하 양상은 웨브로 좌굴이 진전된 이후 큰 내력저하의 모습은 보이지 않았으나 반복가력 횟수가 증가하여 웨브의 좌굴이 심화되는 시점에서 내

력의 저하가 나타나기 시작하였다. 그러나 내력저하의 정도는 4%로 미미하였다. 이후 cycle 역시 4~6%로 꾸준히 감소하여 최종 실험 종료 시에는 내력이 최대내력의 80%로 20% 감소하는 모습을 보였다.

표 3. 실험체별 내력감소율 비교

실험체명	최대내력 발생이후 cycle에서 저하율(%)	웹브로 좌굴 진전시 저하율(%)		실험종료시 저하율(%)	
		최대 내력 대비	이전 cycle 대비	최대 내력 대비	이전 cycle 대비
SOL	6	4	2	6	2
CCN-120	5	5	5	42	2
CCS-120	2	2	0	10	2
CEN-120	6	34	28	74	3
CES-120	6	32	17	50	3
CCN-160	5	5	5	36	4
CCS-160	6	0	12(증가)	19	4

모든 실험체의 전체적인 내력저하의 양상은 웹브로 좌굴이 진전된 이후에 내력저하가 나타났다는 사실이다. 또한, 단부에 좌굴이 발생한 경우 정방향과 부방향의 내력이 차이가 개구부에 좌굴이 발생한 경우보다 더 두드러지게 발생하였는데 이는 대칭성이 상실했기 때문으로 판단된다.

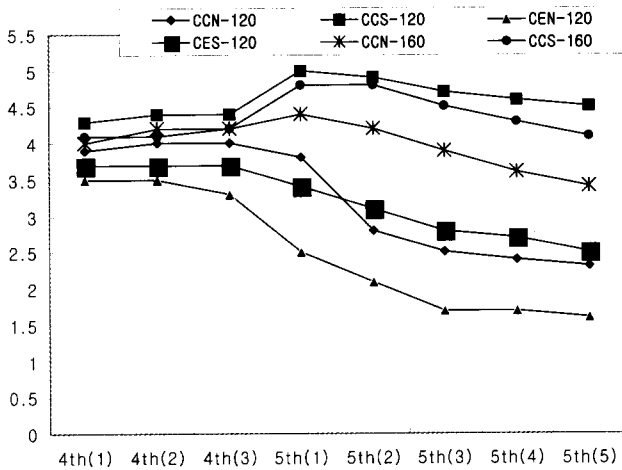


그림 7. 각 실험체별 국부좌굴 이후 내력저하 양상

그림 7은 국부좌굴 발생이후 내력변화 양상이다. 앞서 언급한바 있듯이 CCS-120이 최대내력을 보였고 최소내력과 내력저하율이 가장 큰 것은 CEN-120이었다. 개구부의 크기에 의한 영향보다는 개구부 위치에 영향이 더욱 큰 것으로 본 실험을 통하여 나타났다.

3.5 각 실험체별 비교 분석

모든 실험체의 탄성구간에서의 변위는 거의 일치하였다. 또한, 항복점을 지나 소성영역을 지나감에 따라 변위와 내력의 차이를 보였다.

3.5.1 개구부 위치에 따른 비교

CCN-120, CEN-120 실험체를 개구부 위치별 최대내력을 비교해볼 때 전체적으로 예상한대로 휨모멘트가 큰 단부에서 60%(0.6tf)정도 떨어진다. 그러나 탄성영역에서는 거의 두 실험체 모두 거의 유사한 거동을 보였다. 변위는 두 실험체 모두 큰 차이가 없었으나 하중(내력)에서 두 실험체 간에 차이를 보였다. 최대내력은 CCN-120 실험체는 4.1tf, CEN-120 실험체는 3.5tf로 CCN-120 실험체가 높았다. 최초 국부좌굴 발생하중과, 웹브로 좌굴이 진전된 하중 역시 CCN-120 실험체가 높았다. 그리고 CCN-120과 CES-120의 실험체의 경우 내력저하비율이 상당히 다르게 나타났다. CCN-120 실험체의 경우에는 하중이 별로 감소하지 않은 반면 CCS-120 실험체의 경우 상당한 감소를 보였다. 그리고 스티프너로 보강한 CCS-120과 CES-120의 실험체는 스티프너로 보강하지 않은 실험체와 크게 다르지 않았다.

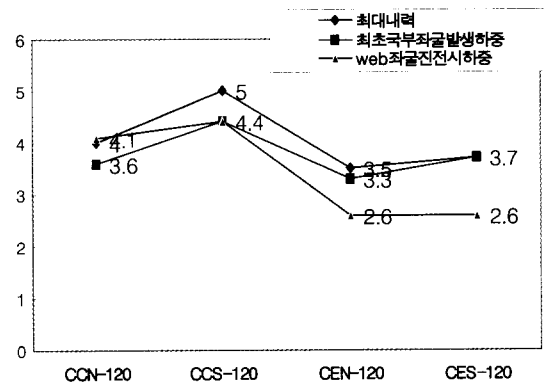


그림 8. 개구부 위치와 보강재유무의 하중비교(tf)

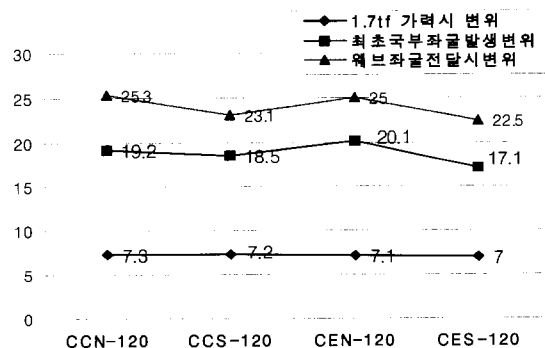


그림 9. 개구부 위치와 보강재유무의 변위비교(mm)

따라서 전체적으로 개구부가 중앙에 위치한 경우보다 단부에 위치한 경우가 즉, M/V비가 큰 경우가 최대내력, 최초 국부좌굴 발생시점, 웹 국부좌굴 발생시점, 실험종료시점 모두 낮았으며, 모멘트를 많이 받는 단부에 가까워질수록 개구부 사이즈와 보강재를 고려해야 할 것으로 사료된다.

3.5.2 개구부 크기에 따른 비교

국부좌굴이 발생한 위치를 살펴보면 CCN-160의 경우 개구부 주변에 발생한 반면, 나머지 3개의 실험체는 휨모멘트를 많이 받는 단부에 발생하였다.

고, CES-120 실험체의 경우 국부좌굴이 단부에 발생하였다. 보강재로 보강을 하여 국부좌굴이 개구부 주변에 발생하지 않고 일반형강의 경우와 같이 단부에 발생한 것을 알 수 있다. CEN-120 실험체의 경우 최초 국부좌굴이 발생한 시점과 CES-120 실험체의 경우를 비교하여 보면 20%의 차이가 나며, 국부좌굴이 심화되어 웹에 발생한 시점에서는 55%에 가까운 차이를 보여 CEN-120 실험체의 경우 부재로서의 기능을 상실하는 것으로 나타났다. Darwin의 제한치 이내의 개구부가 단부에 있을 경우 역시 탄성구간에서는 큰 차이를 보이지 않았으며, 또한, 최대내력도 보강재의 유·무에 관계없이 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 보강재의 보강효과가 현저히 나타나지 않았음을 알 수 있는 결과이다.

표 4. Darwin의 제한치 이내와 제한치를 벗어난 실험체의 실험 결과 비교 (보강재가 없는 경우)

	단위	CCN-120*	CCN-160**	$\frac{CCN-160}{CCN-120}$
변위(탄성역) (0.5tf 가력시)	mm	1.75	2.55	1.46
탄성역최대변위 (1.7tf 시 δ_0)	tf	6.39	6.2	0.97
최대내력	tf	4.0	4.4	1.10
최초 국부좌굴 발생시점	mm	19.17	15.6	0.81
	tf	4.0	3.4	0.85
	주기(cycle)	3 δ_0 ①	3 δ_0 ①	-
웹 좌굴 발생시점	mm	21.1	20.08	0.95
	tf	4.1	3.9	0.95
	주기(cycle)	4 δ_0 ①	4 δ_0 ②	-
실험종료시점	mm	25.26	25.4	1
	tf	2.3	2.5	1.09
	주기(cycle)	4 δ_0 ⑤	5 δ_0 ③	-

표 5. Darwin의 제한치 이내와 제한치를 벗어난 실험체의 실험 결과 비교 (보강재가 있는 경우)

	단위	CCS-120*	CCS-160**	$\frac{CCS-160}{CCS-120}$
변위(탄성역) (0.5tf 가력시)	mm	1.83	2	1.09
탄성역최대변위 (1.7tf 시 δ_0)	tf	6.23	7	1.12
최대내력	tf	5.0	4.8	0.96
최초 국부좌굴 발생시점	mm	18.45	11.9	0.64
	tf	4.4	3.1	0.70
	주기(cycle)	3 δ_0 ①	3 δ_0 ③	-
웹 좌굴 발생시점	mm	18.69	21.12	1.13
	tf	4.4	3.9	0.89
	주기(cycle)	3 δ_0 ⑤	3 δ_0 ⑤	-
실험종료시점	mm	31.15	25.4	1
	tf	3.8	2.5	1.09
	주기(cycle)	5 δ_0 ③	5 δ_0 ③	-

*) Darwin의 제한치 이내의 실험체

**) Darwin의 제한치를 벗어난 실험체

*) Darwin의 제한치 이내의 실험체

**) Darwin의 제한치를 벗어난 실험체

본 실험에서 개구부의 크기에 따른 유공보의 구조적 거동의 차이는 일관성을 보이지 않고 있다. 같은 하중조건에서의 변위량을 CCN-160 실험체가 크게 나타나 예상결과가 나왔으나 최대내력 및 국부좌굴 거동 등은 개구부의 크기에 차이가 없었다. 본 실험에서 Darwin의 제한치보다 10% 증가한 경우의 실험체에서는 보강효과가 그리 크지 못하였다. 이는 개구비 60% 이상에서는 단면 결손으로 인한 내력 저하가 보강 효과로 인한 내력 상승보다 더 크게 작용하여 보강 효과가 없는 것으로 나타났다.

사각형 개구부를 갖는 유공보(이원석, 2001; 이용제, 2001)의 경우 전체적으로 개구부가 커질수록 변위는 증가하고, 하중은 감소하는 양상을 보였지만 원형 개구부를 갖는 유공보의 경우 개구부에 보강재가 있는 경우와 없는 경우 모두 탄성구간 및 최대내력의 차이가 그리 크지 않았다. 그러나 보강재로 보강한 유공보에 있어서 개구부 증가에 따라 보강하지 않은 유공보 보다 최대하중, 최초 국부좌굴 발생, 웹 좌굴진전 등 보강한 것이 유리하였다.

3.5.3 보강재 유무에 따른 비교

스티프너로 보강한 경우를 비교하여 보면 스티프너가 없는 경우보다 내력이 증가하였으나 그 증가의 정도는 크지 않았다. CEN-120 실험체의 경우 국부좌굴이 개구부 주변에 발생하였

보강재의 보강 단면적에 있어서 Darwin의 제한치 이내의 것과 동일한 크기를 사용하였다. 두 실험체의 국부좌굴 발생 위치를 비교하여 보면, CCN-160 실험체의 경우 개구부 주변

에 발생하였으나, 보강재로 보강한 CCS-160의 경우 휨모멘트를 많이 받는 단부에 발생하여 보강재로 보강함으로써 개구부에 국부좌굴이 발생하는 것을 피할 수 있었다. 탄성영역과 최대내력에서 큰 차이는 없었으며, 보강재로 보강한 실험체의 경우 보강하지 않은 실험체와 비교하였을 때 오히려, 국부좌굴 발생 이후는 20%~30% 낮은 내력을 보였다.

따라서 보강효과가 국부좌굴의 발생위치가 개구부 주변에서 단부로 바뀌었으나, 내력면에서는 효과를 기대할 수 없었다. 소성영역에 있어서 보강재에 대한 고려가 필요할 것으로 보인다.

3.6 Darwin 식(1990)의 검증

표 6은 Darwin의 제안식과 본 실험의 탄성한계를 비교하여 안전율을 구한 것이다. 표 6에서 알 수 있듯이 모든 실험체에 있어서 안전율이 적용되고 있다.

표 6. Darwin 식의 규정치와 실험치의 비교

실험체명	규정식 준수여부	Drawin의 제한치 (tf)	실험상의 탄성한계 (tf)	안전계수
CCN-120	OK!	2	3.4	1.4
CCS-120		2.5	3.6	1.3
CEN-120		1.8	2.1	1.1
CES-120		2.2	2.3	1.1
CCN-160	NOT! (개구부크기)	0.7	3.2	1.8
CCS-160		1.4	2.9	1.5

모든 실험체가 탄성범위 안에서는 개구부 크기, 위치, 보강재의 유·무에 관계없이 모두 안전측에 있어 안전성을 확보하고 있는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 CCN-160과 CCS-160의 안전계수가 Darwin 규정식내의 실험체의 안전계수보다 크게 나타나 그에 대한 원인규명이 필요한 것으로 사료된다.

휨모멘트를 많이 받는 단부에 개구부가 위치할 경우에는 안전율이 중앙에 위치한 경우 보다 더 적음을 알 수 있었다. 따라서, 단부에 개구부를 설치할 경우, 보강재에 대한 고려가 반드시 필요한 것으로 판단된다. 또한 탄성영역 이후의 추가적인 하중, 지진하중(반복하중) 등으로 부재가 소성범위까지 하중을 받게되는 경우를 고려한다면 규정식에 의한 개구부를 설계하는 것만으로는 불충분하고 추가적으로 개구부 주위에 보강재를 설치하는 것이 바람직하며, 소성범위에서도 적용 가능한

규정식이 필요하다.

그러나 개구부가 보춤의 70%의 Darwin의 제한치 이내의 개구부를 가진 것과 실험치와 제한치의 비교와 최대내력등 소성영역 이후의 거동 등, 여러 가지를 비교해본 결과 원형개구부를 가질 경우 Darwin의 제한치보다 10% 이상의 개구부를 두어도 여유가 있다고 판단된다. 국부좌굴이 발생한 위치에서 CCN-160 실험체의 경우 개구부 주변에 발생하였으나, CCN-120의 경우 단부에 국부좌굴이 발생하였다.

따라서 Dawin 규정식과 실험결과를 비교해본 결과 보강재의 식에 대한 고려와 소성영역에서의 원형개구부에 대한 규정식에 보완이 필요하며, 원형개구부를 갖는 유공보의 경우 개구부 춤의 70% 이내로 하는 규정에 10%에 대한 여유가 있다고 사료되어 더 많은 실험을 통해 이를 규명해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 실험은 반복하중을 받는 유공보에 관한 프로젝트의 하나로 이전에 사각형 개구부를 가지는 유공보 실험의 이후에 진행된 실험으로서 원형개구부를 갖는 경량 용접 H형강을 대상으로 개구부 형태, 개구부 위치, 보강재의 유·무에 대하여 반복하중 재하에서 유공보의 소성거동을 관찰하고, 각 변수의 영향을 평가하였으며, Darwin제안식의 소성영역에서의 실용성을 검증하였다.

반복하중을 받는 경량 용접 H형강 유공보의 비탄성 반복거동 및 국부좌굴 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 개구부가 Darwin의 제한치 보다 10% 크게 한 경우와 Darwin의 제한치 보다 10%이내의 경우를 비교하여 볼 때 최대내력의 차이는 크지 않았으나 웨브까지 국부좌굴이 진전된 이후의 내력저하는 보강재의 유·무, 개구부 위치에 따라 차이를 보였다.
- (2) 개구부 춤을 Darwin의 제한치 이내로 설계할 경우에는 Darwin의 제안식에서 확인할 수 있듯이 충분한 안전율을 확보하는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 경우에는 보강재로 보강하지 않아도 무방하다고 판단된다.
- (3) 개구부를 사각형이 아닌 원형으로 설계할 경우 Darwin의 제한치보다 10%의 여유가 있다고 판단되어, 이에 대한 보다 많은 실험을 통하여 규명해야 할 것으로 사료된다.
- (4) 개구부를 사각형이 아닌 원형으로 Darwin의 제한치 이내로 설계할 경우 단면결손의 차이, 응력집중의 차이, 국부 좌굴 발생위치 등의 이유로 원형개구부를 갖

는 유공보가 약 1.5~2.0tf 정도 최대내력이 높았다. 또한 사각형 개구부의 경우 모서리에 크랙이 발생하였으나 원형의 경우는 크랙이 발생하지 않았다. 원형의 경우가 사각형 개구부를 갖는 경우보다 충분한 내력을 확보할 수 있어 더욱 안전한 것으로 판단된다.

- (5) 개구부에 보강재로 보강할수록 내력의 증가는 기대할 수 있었으나 그 정도는 미비했다. 보강된 개구부가 중앙에 위치한 실험체의 국부좌굴 이후의 거동은 일반형강의 거동과 같은 양상을 보였으나 나머지 실험체의 경우 내력저하가 심각하게 나타났다.
- (6) Darwin의 제안식에 있어서 탄성영역에서는 충분한 안전율을 확보하고 있으나, 심한 지진하중이나 반복 불비례하중(nonproportional loading)을 받을 경우의 연구가 필요한 것으로 사료된다. 또한 고강도강(TMCP)을 사용한 유공보의 소성영역에서의 유공보의 내력 및 거동을 고려한 Darwin의 설계식의 검증이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(KRF-2001-003-E00486). 연구비지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김종락 (1978), 유공 웨브인 H형강보의 역학적인 거동에 관한 연구, 동국대학교 석사학위 논문.
- 김규석·김종락 (1980), 유공 H형강보의 강성에 관한 연구, 대한건축학회지 24권, 92호, pp. 57-61.
- 박노웅·김원기 (1999), 달걀형 개구부를 가진 합성보의 이력 거동, 한국강구조학회 학술발표대회논문집, pp. 14-21.
- 이승준·김원기·정이근 (1995), 상부 유공 합성보의 극한내

력, 대한건축학회 논문집 11권, 6호, pp. 137-144.

- 이원석 (2001), 반복하중을 받는 유공 H형강 보의 소성거동, 중앙대학교 석사학위 논문.
- 이용제 (2001), 반복하중을 받는 경량 H-형강 유공보의 국부좌굴, 중앙대학교 석사학위 논문.
- Bower, J. E. (1968), "Ultimate Strength of Beams with Rectangular Holes", ASCE, *Journal of the structural Division*, 94: No. ST6, June, pp. 1315-1337.
- Darwin, D. (1990), *Steel and Composite Beams with Web Openings/Steel Design Guide Series 2*, AISC Inc..
- Dougherty, B. K. (1981), "Buckling of Web Post in Perforated Beams", ASCE, *Journal of the structural Division*, 107: NO. ST3, March, pp. 507-519.
- Frost, R. W., and Leffler, R. E. (1971), "Fatigue Tests of Beams with Rectangular web Holes", ASCE, *Journal of the structural Division*, 97: No. ST2, February, pp. 509-527.
- Redwood, R. G., Hernan Baranda, and Daly, M. J. (1978), "Test of Thin-Webbed beams with Unreinforced Holes", ASCE, *Journal of the structural Division*, 104: No. ST3, March, pp. 577-595.
- Redwood, R. G., and Minoru Uenoya (1979), "Critical Loads for Webs with Holes", ASCE, *Journal of the structural Division*, 105: No. ST10, October, pp. 2053-2076.
- Segner, E. P. (1964), "Reinforced Requirements for Girder Web Openings", ASCE, *Journal of the Structural Division*, Vol. 90, No. ST6, pp. 147-164.
- (접수일자 : 2003. 3. 7 / 심사일 2003. 3. 17 / 심사완료일 2003. 5. 14)