

유공 강구조 부재의 반복 국부좌굴거동

Cyclic Local Buckling Behavior of Steel Members with Web Opening

이 은 택 · 고 가 연 · 강 재 훈 · 장 경 호
Lee, EunTaik Ko, KaYeon Kang, JaeHoon Chang, KyoungHo

요 약 : 지진력과 같은 반복 하중 재하시 유공보 부재의 거동과 응력분포, 국부좌굴 발생시점과 내력에 미치는 영향, 크랙 발생 시점과 지점 등에 관해 살펴보았다. 따라서 본 연구에서는 비탄성 부재의 거동과 소성힌지 거동 국부좌굴 후 거동에 대한 실험적 정보를 얻고 반복하중을 받는 유공보의 소성영역에서의 설계지침 및 기준마련을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

반복 하중하의 유공보 거동에 개구형상비, 개구부 편심, 보강재 유무 등을 주요 변수로 하여 AISC의 유공보 기준으로 마련된 다윈에 의해 제안된 식을 바탕으로 결정하였으며 12개의 실험체 실험을 통해 정량적 평가·분석을 하였다. 반복재하에 의한 이력곡선을 작성하고 부재 변위와 초기 강도 및 강도 저하율을 비교함으로써 Darwin에 의해 제시된 유공보 설계방식의 타당성을 검토하였다. 또한 소성 범위에서의 국부좌굴 발생시점을 기준으로, 유공보에서의 가장 위험한 부위를 결정하고 그의 보강규준을 검토하였다.

본 연구의 결과, 개구부의 개구형상비가 증가할수록 최대내력은 작아지며, 항복하중과 최초 국부좌굴 발생시점도 빠르게 발생하였다. 부재가 가지는 연성 및 휨·전단내력도 떨어지는 것으로 나타났다. 편심이 커짐에 따라 최대내력은 증가율은 크게 나타나지는 않았지만 연성에 있어서는 증가를 나타냈다. 전체적인 부재의 휨·전단내력은 큰 변화가 없었다. 개구부 주변 수평 보강재 설치시, 최대내력 및 연성, 휨·전단내력에 있어 전체적인 상승을 보였다.

ABSTRACT : Many studies have been performed to describe the elastic and inelastic behavior of H-shaped beams with web openings that generally concentrated on the monotonic loading condition and concentric web opening. The findings of the studies led Darwin to propose formulas for the design of beams with web openings considering local buckling. While the formulas are simple and useful in real situation, more studies are needed on their cyclic loading condition.

In this experimental study, 12 H-shaped beams with web openings under cyclic loading condition were investigated. The dimension criteria based on the formulas proposed by Darwin were examined. The suitability of existing design formulas and the effects of plastic hinges on beams with web openings and of local buckling around web openings on the beam strength under cyclic loading were also studied. This was done by observing their behavior with various dimensional openings, eccentric per cent, and stiffeners.

핵심용어 : 개구부, 편심, 소성거동, 반복하중, 국부좌굴, 내력저하, 강도저하, 소산에너지, 연성

KEYWORDS : web opening, eccentric, inelastic behavior, cyclic loading, local buckling, strength deterioration, stiffness deterioration, dissipated energy, ductility

1. 서론

유공보 시스템이란 보 밑으로 설치하던 설비용 덕트, 배관류를 보의 웹에 개구부를 뚫어 통과시키는 시스템을 일컫는다. 유공보 시스템은 건물 높이가 제한되고 대형 설비시설이

사용되는 고층건물이나 대규모 건축물에 있어 설비공간을 확보하고 층고를 낮추기 위한 방법으로 사용되고 있다.

이는 구조물 자체의 강재 사용을 줄임으로서 건물의 경제성을 높임과 동시에 부재의 역학적인 거동에 있어서는 수평력에 의한 층모멘트의 감소와 층고 최소화에 따른 기둥의 좌굴 길

- 1) 정회원 중앙대학교 건축학과 조교수
(Tel. 02-820-5340, Fax. 02-812-4150, E-mail:etlee@cau.ac.kr)
- 2) 정회원 중앙대학교 대학원 석사(dorosie@hanmail.net)
- 3) 정회원 중앙대학교 건축학과 조교수(jhkang@cau.ac.kr)
- 4) 정회원 중앙대학교 건설환경공학과 조교수(changkor@cau.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

이 감소와 내력을 증가시키는 역할을 한다. 따라서 최근 건물들이 고층화, 대형화되고 설비 기술 또한 발전해감에 따라 유공보의 사용은 더욱 증가하는 추세이다.

유공보는 일반 보 웹 부분에서 일부 단면 손실을 가짐으로써 웹의 개구부 부분이 복수 부재와 같은 구조 거동을 보이게 된다. 따라서 비이렌델(Vierendeel) 작용에 의한 전단력으로 발생한 개구부 주위 2차 모멘트가 부가적으로 작용함에 따라 보의 휨, 전단내력 및 강성이 크게 저하된다.

그림 1, 2와 같은 유공보에서 쓰이는 일반적인 모멘트·전단력의 조합 응력 상태와 개구부 모서리의 집중되는 응력, 국부좌굴 발생 이후 예측 불가능한 응력 분포 등으로 인해 보 부재의 전체적인 안정성을 정확하게 예상할 수 없다. 그러므로 지진과 같은 반복하중을 받는 경우에 있어, 구조적 문제발생의 여지가 많다고 볼 수 있다.

따라서 유공보의 안전한 설계를 위해서는 반복하중 하에서의 각 변수들이 소성적 거동에 미치는 영향과 국부 좌굴 발생 이후의 내력과 강성 등의 변화에 대한 검토가 반드시 이루어져야 할 것이다. 따라서 현재 AISC규준으로 사용되고 있는 다윈의 제안식을 바탕으로 하여 개구형상비, 편심, 보강재 유무 등을 주요 변수로 하여 반복 하중하의 유공보 거동에 미치는 영향을 실험적으로 평가·분석하기 위한 실험을 계획하였다.

본 연구는 비탄성 부재의 거동과 소성힌지 거동 국부좌굴 후 거동에 대한 실험적 정보를 얻고 반복하중을 받는 유공보의 소성영역에서의 설계지침 및 기준마련을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

유공 H형강보의 연구는 1966년 Bower에 의해 유공웹에 관한 탄성이론으로 해석하였으며 1971년에는 무보강, 무편심, 개구비가 작은 유공보에 대한 설계식을 제안하였다.

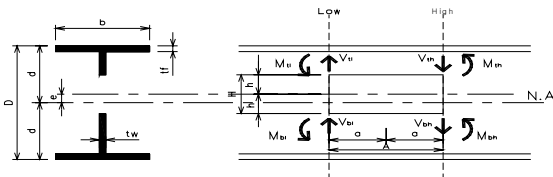


그림 1. 개구부 주위의 힘 평형 상태

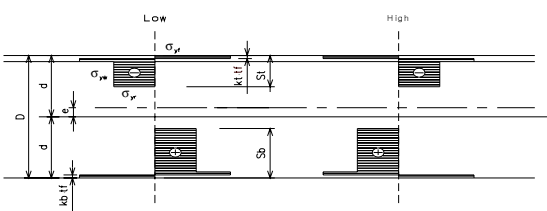


그림 2. 무보강 유공보의 응력분포상태

Redwood는 H형강 구형 유공웹보의 탄성거동에 관한 실험적 연구 및 1968년 다공보의 극한강도에 관한 연구를 함께 수행하고, 이후 1972년에 장방형 유공보의 소성 설계표를 제안하였으며, 1978년에는 한쪽 면만 보강한 H형강보에 대한 연구를 발표하였다. 이밖에도 유공보에 관한 연구는 Cooper 및 Douglas, Snell, Wang, Frost 등에 의하여 활발하게 이루어졌다. 그리고 1990년 Darwin에 의해 유공보 설계 규준식이 제안되었다.

국내 유공보에 관한 연구는 김종락, 김규석에 의해 H형강보의 구조적 거동에 관한 연구가 수행되었고, 최근의 연구로서 1992년 김순영에 의해 개구부 형상비가 큰 경우에 대한 연구와 보강 유공 H형강보에 관한 김규석, 김순영, 신영수 등에 의한 연구 등이 개구비 및 개구형상비, 편심률에 따른 합리적인 보강 방법을 제시하기 위해 수행되었다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험체 계획

본 연구에서는 전단력과 휨을 동시에 받는 유공보의 각 변수들의 관계와 소성영역에서의 역학적 거동을 살펴보기 위해 계획하였다.

현재 동부제강(주)에서 생산되고 있는 H-200×100×3.2×4.5(SS400, $F_y=2.4\text{tf/cm}^2$) 경량용접강을 사용하였다. 개구부 설계는 1990년 AISC Steel Design Guide로 발행된 Darwin의 유공보 설계 규정식을 토대로 하였다. 기존의 실험결과를 고려하여 본 연구에서는 사각형 개구부에 있어 개구형상비와 개구부 위치의 편심률, 보강유무 등을 주요변수로 하였다. 이러한 변수를 토대로 12개의 실험체를 다윈의 제안식을 기준으로 제작하였다.

다윈의 제안식에 의한 유공보의 개구형상비에 대한 조건은 개구비의 3배를 최대 한도로 정해놓고 있다. 따라서 개구형상비가 3을 초과하는 경우 무조건적 보강재 사용이 일반화되어 있다. 여기서 개구형상비의 변화에 따른 내력의 변화를 파악하기 위해서 다른 모든 조건의 변수를 안전한 수치로 두고 다윈이 제안한 값의 임계값을 결정하기 위해 규준치 내의 2, 3 규준치 외의 4 개구형상비를 계획하였다.

또한 유공보에 있어서 실제적인 사용이 많이 요구되면서도 많은 연구가 이루어지지 않은 편심 개구부의 영향을 살펴보는 것도 중요하다. 반복하중을 받을 경우 압축과 인장 티 영역이 변화함으로 인한 전단·휨거동을 명확하게 파악할 수 없다. 이를 위해 5%, 10%의 편심을 가지는 개구부를 계획하였다. 편심의 영향을 정량적으로 살펴보기 위하여 개구비는 규준내인

45%로 고정시키고 개구형상비는 규준내인 2와 규준외인 4를 비교하였다.

각 경우에 있어서 보강재의 영향을 알아보기 위해 규준외 경우는 모두 보강재를 설치하여 무보강일 경우와 비교·평가 하였다.

유공보의 내력에 큰 영향을 미치는 개구형상비와 개구부 위치의 편심률, 보강유무 등의 영향을 정량화하기 위해 모든 실험체의 개구비를 45%로 고정시키고 M/V비가 50인 지점에 개구부를 설치하였다. 보강도 모든 실험체에 양면 수평보강형식을 취하였다.

표 1. 실험체 일람 (단위:cm, Ar:cm²)

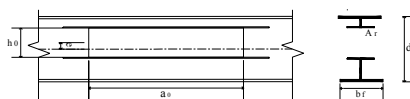
실험체명	d	b	tw	tf	M/V	h0	a0	st	e	Ar
SOLID	20	10	0.32	0.45	50	4.5	-	-	-	1.92
RN45-2							9	5.5	-	
RN45-3							13.5	5.5	-	
RN45-4							18	5.5	-	
RN45-2E1							9	4.5	1	
RN45-2E2							9	3.5	2	
RN45-4E1							18	4.5	1	
RN45-4E2							18	3.5	2	
RS45-3							13.5	5.5	-	
RS45-4							18	5.5	-	
RS45-4E1							18	4.5	1	
RS45-4E2							18	3.5	2	

* RN45-2E1

- └ 편심율-E1: 5%편심, E2: 10%편심
- └ 개구형상비-2, 3, 4
- └ 개구비-45: 45%
- └ 보강유무-무보강: N, 보강: S
- └ 개구부 형태-사각형:R



(a) 비보강 개구부와 단면



(b) 보강개구부와 단면

그림 3. 개구부 각부 명칭 일람

2.2 사용재료의 역학적 성질

실험에서 사용된 SS400강재를 각각 웨브와 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 3에 나타내었다. 모든 시험편의 항복강도는 설계기준강도 2.4t/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

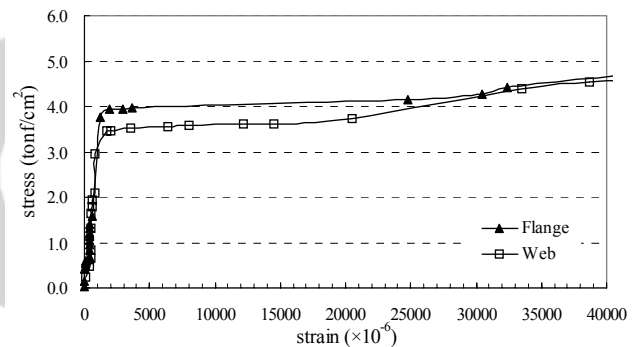


그림 4. 재료의 응력-변형률 관계

2.3 실험방법

실험체 가력은 중앙대학교 구조 실험실 소재 60t용량의 오일잭(Oil-Jack)을 이용하여 0.1mm/s로 가력하였다. 가력점과 로드셀 사이에는 힌지를 설치하였으며 각각의 힌지는 마찰력 최소화를 위해 윤활유를 주입하였다.

실험체 자유단 부분 변위 측정을 위해 300mm Linear Variational Deformation Transducer를 설치하였다. 각 실험체의 주된 변형이 발생하는 개구부 모서리, 플랜지, 스트프너 등에서의 변형률 측정을 위해 스트레인 게이지를 부착하였으며, 각도기와 자를 이용하여 국부좌굴 발생범위 및 경사를 측정하였다.

모든 실험체는 0.5ton 가력시까지 각각 정방향 가력과 부방향 가력을 1사이클로 하여 3사이클을 가력하면서 고정단에 설치된 스트레인 게이지의 변위값을 통해 이론치와 실험치의

비교과정을 거쳤으며 측정장치 및 실험체 설치 상태의 안정성을 검토하였다.

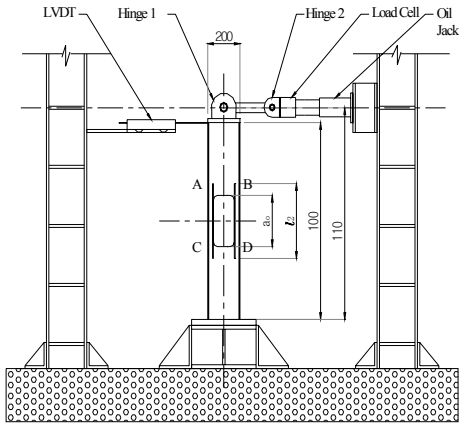


그림 5. 실험체 가력 및 측정 장치

국부좌굴 발생으로 인한 내력 저하 시점을 보다 정밀하게 발견하기 위해 변위제어 방식을 택하였다. 단조하중-변위 곡선에서 초기강성 구배를 갖는 직선과 초기강성 기울기의 1/3인 직선을 평행이동 시켰을 때 발생하는 하중을 항복하중 P0로 정하였으며, 이 때의 변위를 항복변위 δ0로 정하였다. 각 실험체에서 δ0가 결정되면 이후 1.5δ0, 2δ0, 2.5δ0 등 δ0의 50%씩 변위를 증가시켜 가력하는 것을 원칙으로 하였다. 하지만 최초 변위가 다른 실험체에 비해 큰 경우에는 δ0에 일정 값을 증가시켜 가력하는 방식을 택하기도 하였다. 각 δ0별로 3사이클씩 반복가력 하였으며 내력저하가 최대내력의 50% 이상이거나 좌굴의 진전에 의한 개구부 균열이 발생하면 실험을 종료하였다.

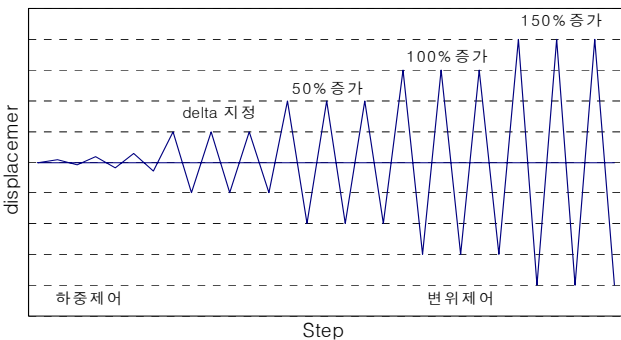


그림 6. 변위제하 이력

실험결과로 얻은 모든 데이터는 자동변형측정기(TDS-302)를 통해 저장하였다. 국부좌굴 발생시점의 하중은 육안으로 파악하였으며, 기록된 데이터의 하중과 비교하여 결정하였

다. 실험체 가력 및 측정장치를 그림 4에 변위제하 이력을 그림 5에 나타내었다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 하중-변위 관계 및 국부좌굴양상

각 실험체별 하중-변위곡선을 그림 7에 나타내었다. 일반적으로 모든 실험체는 초기 탄성범위 내에서 무공변과 같은 거동을 한다. 보강되지 않은 개구부를 갖는 실험체는 모두 개구부 모서리의 국부좌굴 발생으로 인한 균열파괴를 일으켰다.

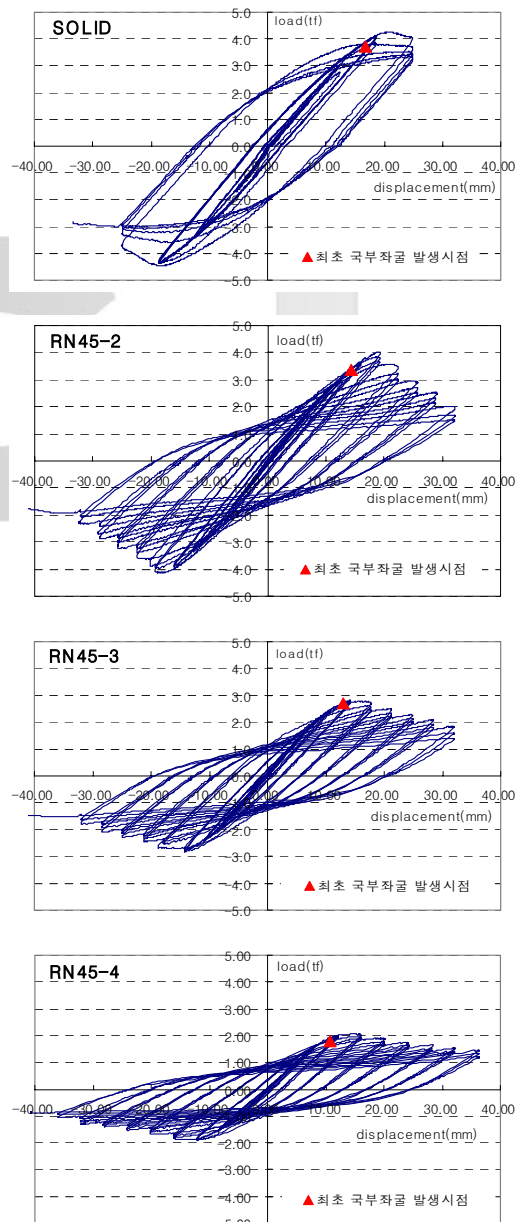


그림 7. 각 실험체별 하중-변위 그래프(계속)

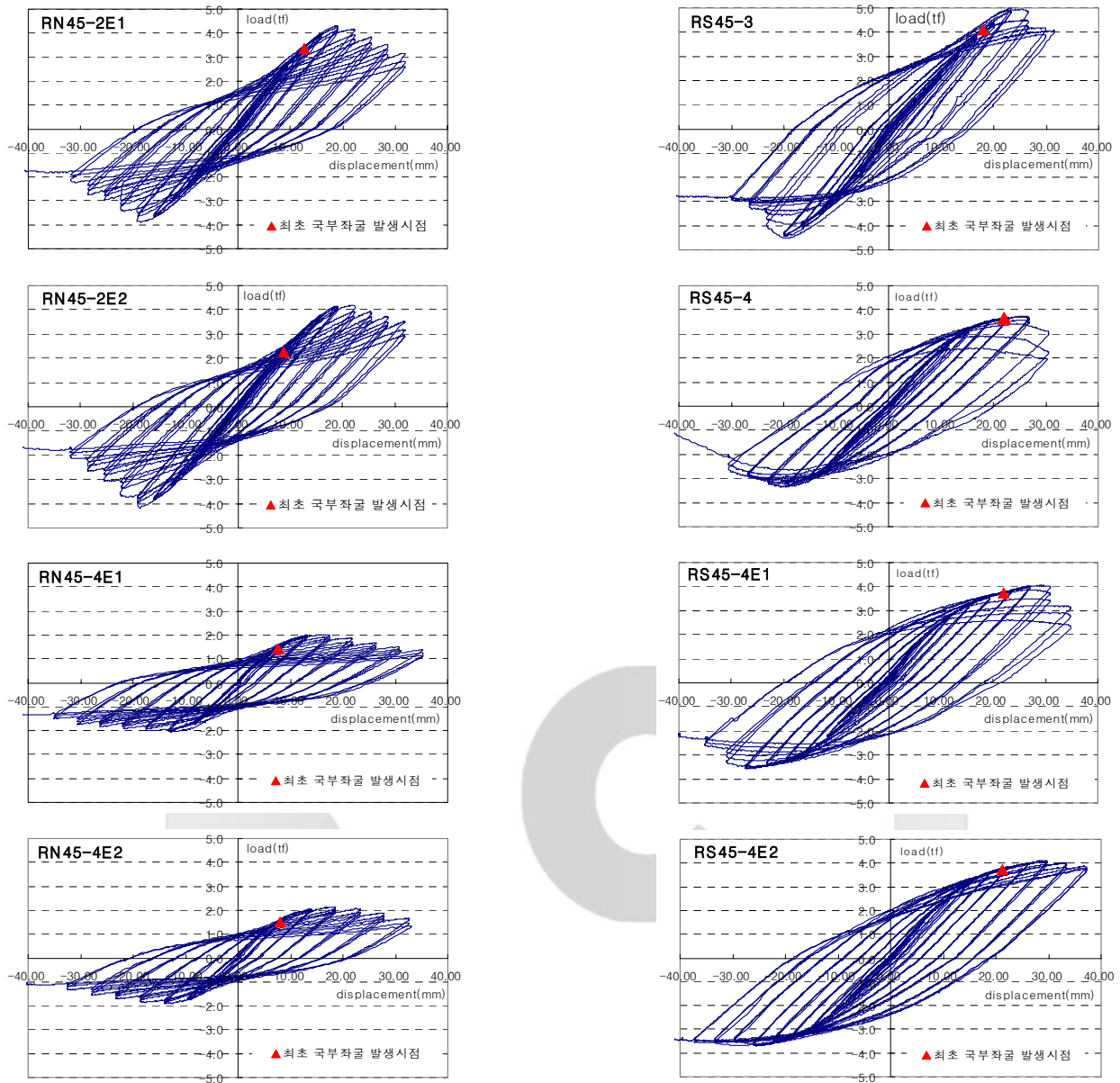


그림 7. 각 실험체별 하중 변위 그래프

보강재가 있는 개구부의 경우 무공보와 거의 비슷한 거동형태를 보이면서 개구부의 압축 플랜지 부분에 국부좌굴이 발생하였다. 최대내력과 균열발생지점 등은 개구부의 편심보다 개구형상비에 의해 크게 좌우되는 경향을 나타내었다.

보강되지 않은 개구부를 가진 유공보의 전반적인 실험체 파괴양상을 살펴보면, 먼저 압축력을 받는 부분의 취약한 개구부 모서리부분으로부터 석고 박리현상을 나타내면서 미세한 변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 변위와 가력 횟수가 증가할수록 이러한 변형은 더 심화되어 개구부 모서리 국부좌굴이 발생한다. 국부좌굴 발생으로 인한 응력집중으로 개구부 모서리에는 소성힌지가 발생하게 되고 최대내력 발생 후 점차적인 내력과 강성저

하를 나타낸다. 이러한 실험체 변형이 진전되면서 개구부 모서리의 균열이 발생하면서 실험체는 파괴에 이르게 된다.



그림 8. 단부 국부좌굴 양상 및 개구부 균열 형상

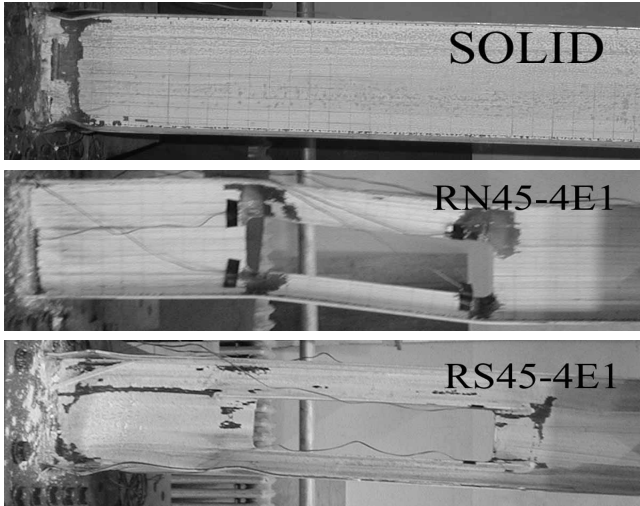


그림 9. 본 실험의 대표적 국부좌굴 양상

3.2 개구형상비의 영향

그림 7에 개구형상비에 따른 단조가력 치환 하중-변위 관계를 나타내었다. 개구형상비 3까지는 무공보와 거의 비슷한 초기강성을 지닌다. 개구형상비가 커질수록 최대내력이 감소하며 내력 저하는 천천히 발생한다.

부재 내력에 있어 형상비 2인 경우, 최대내력이 무공보와 비슷한 값을 나타내고 있다. 이는 개구부의 춤과 너비에 있어서 규준내 실험체는 일정한 안전치를 가질 것으로 보인다. 규준 외 개구형상비 4를 갖는 실험체는 무공보의 50%이하 최대내력을 보여 적절한 보강이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

최초 국부좌굴이 발생하는 시점을 살펴보면, 무보강일 경

우 규준내의 개구부는 2.580일 때 최초 국부좌굴이 발생하는 것에 비해 규준의 개구형상비 4인 경우는 1.580에서 최초 국부좌굴이 발견되었다. 국부좌굴 발생시점이 빨라진다는 것은 그만큼 개구부 모서리 주변의 소성화가 빨리 진행되고 있다는 것을 나타내며, 부재가 받을 수 있는 응력도 그만큼 줄어드는 것을 일컫는다.

그림 10에서는 RN45-2가 최대내력 후 가장 빠른 내력저하 양상을 보이고 개구형상비가 커질수록 저하율이 낮은 것을 알 수 있다. 강성 저하율은 개구형상비에 관계없이 비슷한 양상을 보이고 있으나, 개구형상비가 작을수록 강성저하율도 다소 큰 것을 알 수 있다. 보강재를 설치한 경우에는 강성에 있어 싸이클이 바뀌는 동안 5%내외의 감소율을 보임으로서 개구형상비에 관계없이 강성확보에 유리함을 알 수 있다.

그림 11과 같이 개구형상비가 증가할수록 항복비는 작아지는 경향을 보인다. 형상비 3 이후 항복비 감소율이 계속 진행 하기는 하지만 그 정도가 미미하다. 개구형상비 2와 3사이에서 유공보의 항복비 감소현상이 크게 일어남으로서 형상비 2를 넘는 경우에 있어 항복비에 대한 고려가 필요할 것으로 보인다.

또한 최대하중까지의 소산에너지량을 항복에너지로 나눈 μ_E 값도 개구형상비가 2에서 3으로 변할 때 급격히 감소하는 경향을 보여주고 있다. 보강재 사용시 무차원한 소산 에너지 양이 규준의 개구부에서도 무보강의 규준내 개구형상비가 가지는 연성보다 더 우수한 수치를 나타내었다. 이는 개구형상비의 증가보다 보강재의 사용이 연성 확보에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

표 3. 실험결과 일람

Specimen	항복하중 및 변위				최대하중 및 변위				국부좌굴 발생시점		Pmax/Py		Ky1)		δ_b / δ_y 2)	μE 3)	Failure Location4)
	+		-		+		-										
	Py	δ_y	Py	δ_y	Pmax	δ_{max}	Pmax	δ_{max}	+	-	+	-	+	-			
SOLID	3.28	13.53	3.49	12.87	4.11	18.69	4.34	18.72	3.70	16.89	1.25	1.24	0.24	0.27	1.25	-	E.B.
RN45-2	2.89	12.60	2.85	10.71	3.96	19.23	4.01	19.35	3.40	14.31	1.37	1.41	0.23	0.27	1.14	13.40	O.F.
RN45-3	2.58	10.54	2.70	11.75	2.78	14.22	2.77	14.25	2.69	12.99	1.08	1.03	0.24	0.23	1.23	6.47	O.F.
RN45-4	1.92	9.27	1.85	10.18	2.01	16.05	1.84	12.15	1.79	10.65	1.05	1.01	0.21	0.18	1.15	3.45	O.F.
RN45-2E1	3.13	11.82	2.80	11.34	4.26	19.11	3.84	19.29	3.40	12.63	1.36	1.37	0.26	0.25	1.07	13.88	O.F.
RN45-2E2	2.82	11.34	2.83	10.44	4.13	19.11	4.09	19.35	2.30	8.73	1.46	1.45	0.25	0.27	0.77	14.41	O.F.
RN45-4E1	1.82	8.64	1.95	9.66	1.99	17.55	2.03	13.17	1.40	7.59	1.09	1.04	0.21	0.20	0.88	7.56	O.F.
RN45-4E2	1.84	8.33	1.76	8.83	2.10	18.63	1.90	13.95	1.50	7.95	1.14	1.08	0.22	0.20	0.95	10.55	O.F.
RS45-3	4.04	17.97	3.49	13.68	4.99	23.28	4.41	19.92	4.10	17.91	1.24	1.26	0.22	0.26	1.00	14.75	E.B.
RS45-4	3.22	14.26	3.17	15.26	3.68	22.89	3.28	19.50	3.64	21.96	1.14	1.03	0.23	0.21	1.54	13.93	E.B.+O.F.B.
RS45-4E1	3.43	14.74	3.21	16.32	3.98	27.03	3.52	27.39	3.72	21.93	1.16	1.10	0.23	0.20	1.49	13.29	E.B.+O.F.B.
RS45-4E2	3.44	14.74	3.32	15.96	4.06	29.64	3.64	25.95	3.73	21.21	1.18	1.10	0.23	0.21	1.44	13.14	E.B.+O.F.B.

- 1) 초기강성 Ky는 Py/ δ_y 에 의해 산정
- 2) δ_b / δ_y 국부좌굴 발생시점 변위와 항복하중과의 비교를 통한 연성요소
- 3) δ_{max} 까지 에너지 소산능력과 항복싸이클의 에너지 소산능력 비교를 통한 연성요소 μE
- 4) O.F. : Opening Failure, E.B. : End Buckling, O.F.B. : Opening Flange Buckling

개구형상비에 대한 휨내력과 전단내력을 그림 12에 나타내었다. 개구형상비가 2에서 3으로 증가할 때 휨내력이나 전단내력의 급격한 감소를 보이고 있다. 개구형상비 4인 경우는 휨내력이 0.4 이하의 값을 나타내고 전단내력도 1이하의 값을 나타내 내력확보에 대한 고려가 있어야 할 것으로 보인다. 규준내 개구형상비의 보강재 사용의 경우 월등한 내력상승을 가져왔으나 개구형상비의 증가에 따른 감소율은 무보강일 경우와 비슷하게 나타났다.

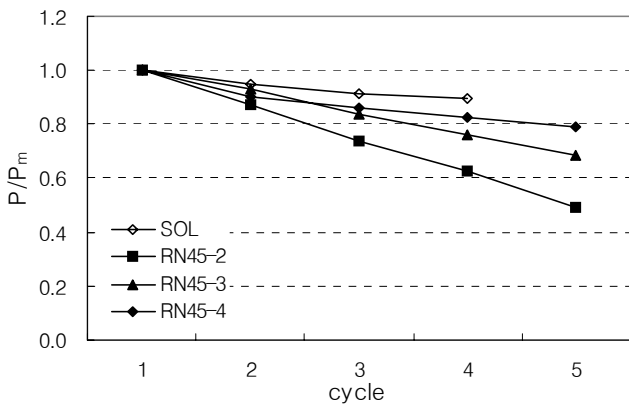


그림 10. 개구형상비에 따른 내력저하양상

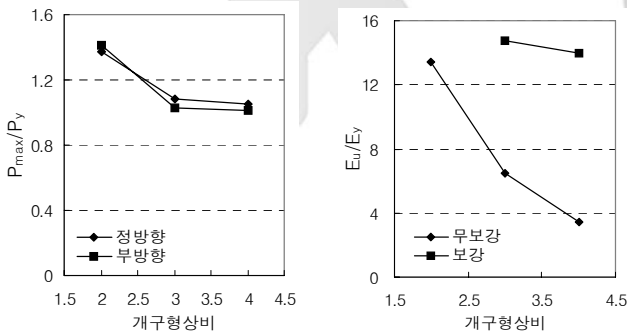


그림 11. 개구형상비에 따른 항복비 및 에너지변화량

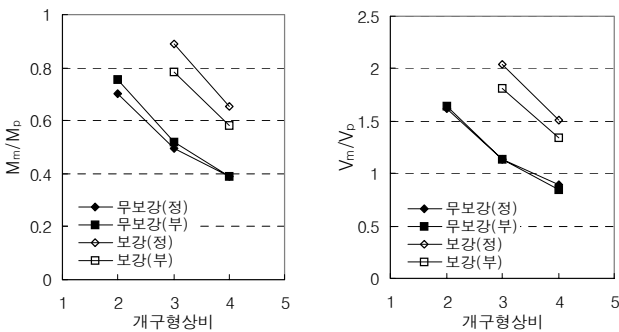


그림 12. 개구형상비에 따른 휨·전단내력

3.3 개구부 편심의 영향

편심율에 따른 하중-변위 곡선을 살펴보면, 편심율이 증가할수록 약간의 내력상승이 나타남을 알 수 있다. 기존 단조가력 실험에서 압축측 편심율을 갖는 유공보의 내력이 상승하는 것으로 나타났었다. 하지만 본 실험에는 압축과 인장이 반복가력되었음에도 불구하고 내력이 상승한 것은 다윈 제안식에서 티 영역의 좌굴 방지를 위해 제시한 추가적인 검토사항 식 (1)이 4이상의 값을 나타내는 것이나, 상·하부티가 0.15d보다 커야한다는 식을 인장측이나 압축측의 티영역 모두 만족시키고 있기 때문으로 본다. 따라서 인장측이 충분한 St를 갖지 못할 경우의 반복가력에 대한 실험이 앞으로 이루어져야 할 것으로 보인다.

$$\nu = a_0 / s \tag{1}$$

개구형상비가 2일 경우와 개구형상비가 4인 보강된 유공보의 경우에 있어서는 무공보와 거의 동일한 하중-변위곡선을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

내력저하에 있어서는 그림 13에 나타나는 바와 같이 정방향, 즉 편심개구부가 인장측에 위치할 경우, 개구형상비 2일 때는 편심율이 커짐에 따라 내력저하비율이 적게 나타나고 있다. 개구형상비 4에 있어서는 5%편심율을 가지는 개구부보다 10%의 편심율을 가지는 실험체가 내력이 더 천천히 감소하는 경향을 보이고 있다. 하지만 부방향의 경우, 즉 편심개구부가 압축측에 위치할 때는 5%편심율의 이 가장 적은 내력저하를 보이고 무편심, 10%편심율을 갖는 실험체의 차례로 내력저하 비율 컸다. 이로서 압축측 편심율이 일정한 경우까지는 내력저하비율이 무편심에 비해 작으나 그 이상의 편심율에 있어서는 그 비율이 증가함을 예측할 수 있다.

그림 14에서 편심율에 따른 항복비를 살펴보면, 편심율이 증가함에 따라 약간의 항복비 증가가 발생함을 알 수 있다.

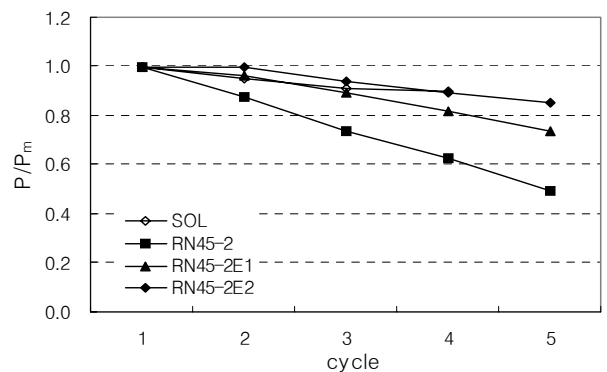


그림 13. 편심율에 따른 내력저하양상

또한 그림 15에 따르면 편심율이 10%증가함에 따라 약 50%의 μ_E 값이 증가하며 이는 즉 부재의 연성능력이 증가하는 것을 나타내고 있다.

각각의 에너지 소산능력은 보강된 개구형상비 4가 가장 많은 에너지를 가짐으로서 형상비가 작은 부재보다도 보강된 큰 형상비의 실험체가 더 많은 연성능력을 가진 것으로 사료된다.

그림 16에는 휨·전단내력에 대한 편심율의 영향을 나타내었다. 여기에 나타난 바와 같이 휨 내력에 있어서는 편심율의 영향보다는 개구형상비에 의한 영향과 보강재 유무에 의한 영향이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 전단내력에 대해서는 편심개구부가 위치한 티 영역의 전단내력은 편심율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이지만, 그 반대 티 영역에 있어서는 감소하는 것을 알 수 있다.

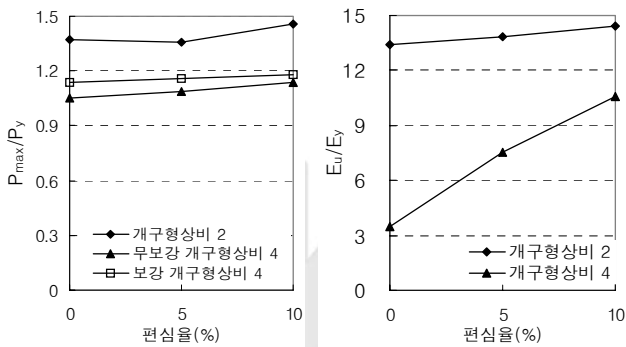


그림 14. 편심율에 따른 항복비 및 에너지변화량

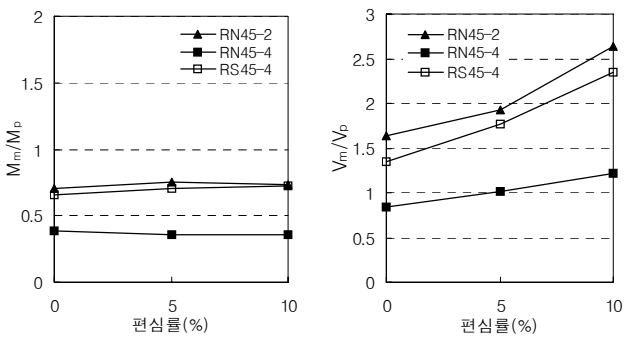


그림 15. 편심율에 따른 휨·전단내력

3.4 보강재 유무의 영향

보강재 유무에 따른 하중-변위 관계 그래프에서 보는 바와 같이, 보강을 한 경우 무보강에 비해 전체적 내력에서 2배 정도의 차이를 보이고 있다.

그래프상에서 보강재의 내력저하가 무보강의 경우보다 크게 나타난 부재가 있으나, 이는 최대내력 후 변위 싸이클에 따른 저하율을 나타내는 것으로, 실제적으로 보강재 사용한 부재의

최대내력과 그 변위가 크기 때문으로 보강재 사용이 부재의 내력저하를 더 빨리 발생시키는 것을 나타내는 것은 아니다.

그림 16에서 실험체는 보강재 사용시 각 변수에 대한 항복비가 평균 15%증가하였다. 보강재 사용 후 개구형상비 4보다 3인 실험체의 항복비 증가율이 더 컸다.

그림 16의 에너지 소산능력은 개구형상비 4인 경우 약 3.5배 정도의 증가를 가져왔다. 또한 편심된 개구부를 가질수록 보강재에 의한 에너지 상승율은 무편심에 비해 낮게 나타났다.

그림 17은 보강유무에 따른 휨·전단내력을 나타내고 있다. 개구형상비 3인 경우, 보강재 설치에 의해 휨내력은 0.52에서 0.89로 70%, 전단내력이 1.14에서 1.81로 59%증가하였다. 개구형상비 4인 경우는 휨내력이 0.39에서 0.65로 67%, 전단내력이 0.84에서 1.34로 60%증가하였다.

휨내력은 편심에 의한 모멘트 증가율이 별 차이를 나타내지 않았으나, 티영역에 따른 전단내력의 차이가 발생하였다. 편심된 부분의 티영역 전단내력은 편심율이 커질수록 증가하였으나, 맞은편 부분 티영역의 전단내력은 편심율이 커질수록 작아지는 경향을 나타냈다.

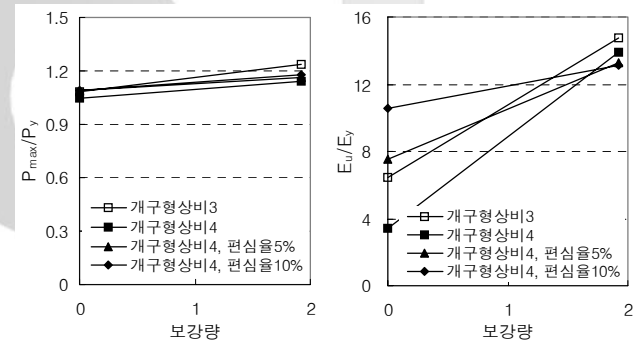


그림 16. 보강재 유무에 따른 항복비 및 에너지변화량

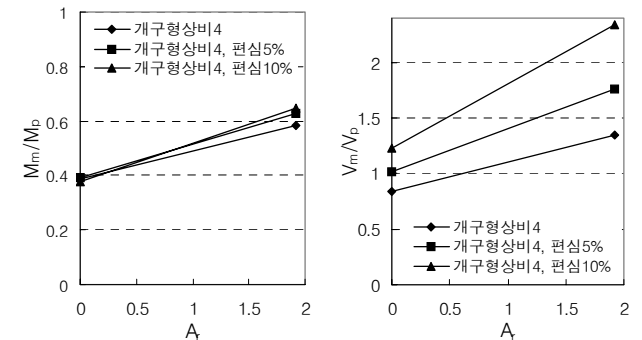


그림 17. 편심율에 따른 휨·전단내력

3.5 다윈의 제안식과 비교

표 4에 본 실험결과와 다윈의 제안식 값 비교를, 그림 18

에 각 변수에 대한 휨·전단내력의 이론과 실험값 비를 나타내었다. 여기서 항복하중에 있어서 다윈이 제안한 식보다 실험값 대비 평균 0.51정도 큰 값을 가짐으로서 안전한 값을 제시하고 있음을 알 수 있으나, 편차는 심하게 나타났다. 전단내력에 있어서도 실험값이 평균 1.50으로 다윈의 제안값에 비해 50%정도로 충분한 안전율을 가지고 있음을 알 수 있다. 휨내력에 있어서는 평균 0.61, 표준편차 0.19로서 실험값이 다윈이 제안한 값보다 낮은 값을 나타내지만, 편차는 가장 작은 것으로 나타났다.

휨모멘트에 있어서는 Exp./Pro.값이 1보다 작음으로서 다윈이 제안한 휨내력이 과대함을 나타내고 있다. 하지만 전단내력에 있어서는 과도한 안전율을 가지는 것으로 나타난다.

개구형상비가 증가함에 따라 Exp./Pro.도 감소하는 것을 볼 수 있으며 이는 개구형상비 증가에 따른 다윈의 제안값이 단면 감소에 대한 적절한 고려를 하지 않아 과대한 값을 가지

표 4. 실험값과 Darwin제안값 비교·분석

Specimen	Py(tonf)			Mm/Mp			Vm/Vp		
	Exp.	Pro.	Exp./Pro.	Exp.	Pro.	Exp./Pro.	Exp.	Pro.	Exp./Pro.
SOLID	3.28	-	-	-	1.00	-	-	1.00	-
RN45-2	2.89	2.35	1.23	0.75	0.94	0.80	1.64	0.98	1.68
RN45-3	2.58	1.79	1.44	0.52	0.94	0.55	1.14	0.74	1.54
RN45-4	1.92	1.44	1.33	0.39	0.94	0.41	0.84	0.59	1.43
RN45-2E1	3.13	2.38	1.32	0.74	0.92	0.81	1.92	1.21	1.59
RN45-2E2	2.82	2.47	1.14	0.81	0.90	0.91	2.64	1.63	1.62
RN45-4E1	1.82	1.47	1.24	0.39	0.92	0.43	1.02	0.74	1.38
RN45-4E2	1.84	1.56	1.18	0.38	0.90	0.42	1.22	1.01	1.22
RS45-3	4.04	2.25	1.80	0.89	1.00	0.89	1.81	0.93	1.94
RS45-4	3.22	1.82	2.32	0.65	1.00	0.65	1.34	0.75	1.80
RS45-4E1	3.43	1.85	1.85	0.71	1.00	0.71	1.76	0.93	1.90
RS45-4E2	3.44	1.94	1.77	0.72	1.00	0.72	2.35	1.25	1.87
Mean	-	-	1.51	-	-	0.61	-	-	1.50
Std.	-	-	0.37	-	-	0.19	-	-	0.23

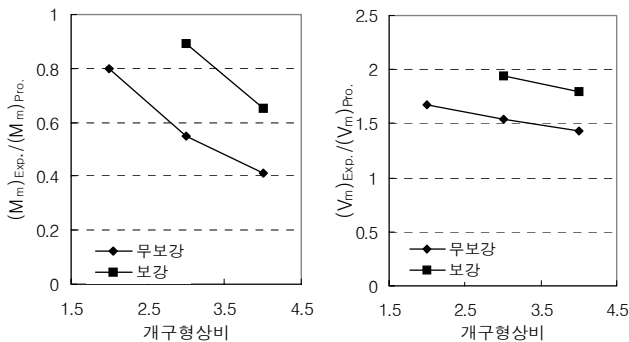


그림 18. 개구형상비와 Exp./Pro.의 관계

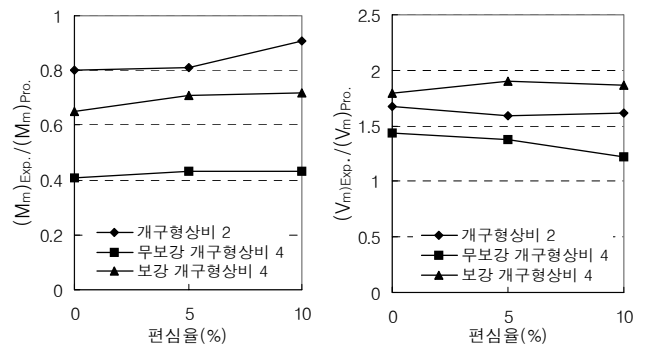


그림 19. 편심율과 Exp./Pro.의 관계

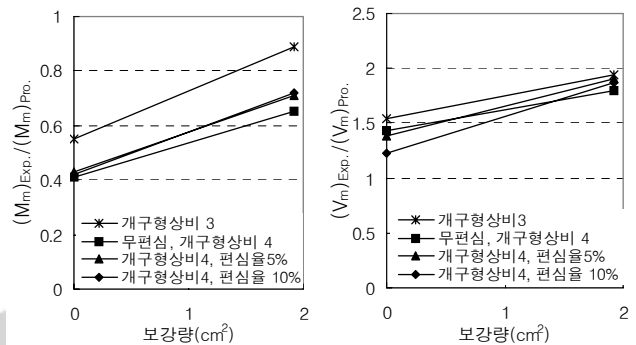


그림 20. 보강재 유무와 Exp./Pro.의 관계

는 것으로 사료된다. 또한 보강재 사용에 있어서는 Exp./Pro. 값이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 보강재에 의한 응력 증가를 더 고려해야 할 것으로 보인다.

그림 21은 다윈의 모멘트-전단력 상관도에 탄성범위내 각 실험체의 결과치를 모멘트와 전단력을 산정하여 나타낸 것이다. 모든 실험체가 다윈이 제안한 모멘트-전단력비의 상관관계 그래프에서 식 (2)을 만족시키면서 안전측인 R=1값 내에 위치하고 있음을 알 수 있다.

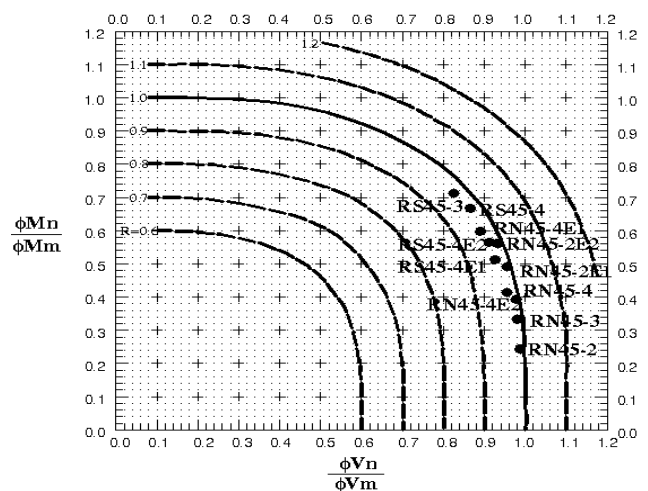


그림 21. Darwin 제안식에 의한 모멘트-전단력 상관도

$$\frac{\Phi M_n^3}{\Phi M_m} + \frac{\Phi V_n^3}{\Phi V_m} = R^3 \quad R = 1 \quad (2)$$

4. 결 론

본 연구의 주요목적은 반복하중을 받는 유공보의 소성거동에 영향을 미치는 각 변수들과 국부좌굴발생의 부재거동에 대한 영향을 실험적으로 비교·분석하여 정량적인 평가를 하고자 하는데 있다. 주요 변수는 개구형상비, 개구부 편심율, 보강재 유무 등이다. 12개의 실험체의 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 개구부의 개구형상비가 증가할수록 최대내력은 작아지며, 부재가 가지는 연성 및 휨·전단내력도 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 개구형상비가 2에서 3이 될 경우가 3에서 4로 변할 경우보다 큰 비율로 나타났다. 그러나 내력·강성이 최대내력 후 저하되는 비율은 개구형상비가 클수록 작게 나타났다. 이것은 개구형상비가 작은 실험체의 최대내력이 높음에 따른 상대적인 싸이클별 감소율이기 때문이라 판단된다.
- (2) 편심율이 커짐에 따라 최대내력은 증가율이 10%미만으로 크게 나타나지는 않았다. 하지만 연성에 있어서는 2배 이상 증가한 경우도 나타났다. 전체적인 부재의 휨·전단내력은 편심율에 의한 큰 변화는 없었다. 하지만 서로 다른 티 영역에서의 한쪽은 편심율의 증가에 따라 전단내력이 증가하는 반면, 다른 쪽은 감소하는 경향을 나타내었다.
- (3) 개구부 주변 수평 보강재 설치시, 최대내력 및 연성, 휨·전단내력에 있어 전체적인 상승을 보였다. 전단내력의 경우, 무보강에 비해 최대 2배 증가하기도 하였다. 에너지 흡수율에 따른 연성도 3배가량 증가함으로써 보강재 사용에 의해 유공보의 내력확보에 많은 영향을 줄 것으로 판단된다.
- (4) 유공보의 개구부 모서리에서 국부좌굴이 발생한 후라도 부재 단면의 전체 소성화가 이루어지지 않았기 때문에 실험체는 최대내력 발휘 후 각 싸이클마다 내력 및 강성이 저하되었다. 내력저하율은 약 15%, 강성저하율은 약 10%내외의 감소율을 보였다.
- (5) 다윈의 제안식과 본 실험의 실험값을 비교·분석해 볼 경우, 탄성 영역 내 값과 전단내력에 있어서는 충분한 안전치를 지니며 실험값을 적절하게 평가하고 있음을 알 수 있다. 하지만 휨모멘트에 대한 제안치가 너무 과대한 경향이 있으며, 소성영역에 있어서 다윈식의 사용

에 대한 재고가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구결과를 종합해 볼 때 이제까지 이루어진 실험을 바탕으로 반복하중을 받는 유공보에 있어 적용 가능한 실험식의 제안이 이루어져야 할 것이며, 유공보에 있어서 휨이 아닌 비틀림 모멘트와 이런 하중의 조합에 의한 실험도 이루어져야 할 것이다. 또한 국부좌굴 후의 거동에 대해 본 연구에서 이루어진 실험변수 외, 부재의 다양한 단면과 하중조건, 폭-두께비를 고려한 지속적인 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2001년 포항제철의 사외위탁 연구과제 프로그램의 도움을 받아 수행한 결과의 일부로 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

김종락, 『유공 웹보인 H형강보의 역학적인 거동에 관한 연구』, 동국대학교 석사학위 논문, 1978

김규석, 김종락, 『유공 H형강보의 강성에 관한 연구』, 대한건축학회지 24권, 92호, pp. 57-61, 1980. 2.

이승준, 김원기, 정이근, 『상부 유공 합성보의 극한 내력』, 대한건축학회 논문집 11권, 6호, pp. 137-144, 1995

이원석, 『반복하중을 받는 유공 H형강 보의 소성거동』, 중앙대학교 석사학위 논문, 2001

이용재, 『반복하중을 받는 경량 H-형강 유공보의 국부좌굴』, 중앙대학교 석사학위 논문, 2001

오우훈, 『반복하중을 받는 경량 H-형강 유공보의 소성거동 및 국부좌굴』, 중앙대학교 석사학위 논문, 2002

Bower, J. E., *Ultimate Strength of Beams with Rectangular Holes*, ASCE Journal of the structural Division 94: No.ST6 (June 1968): 1315-37

Cooper, P. B., *Failure Tests on Beams with Eccentric Web Holes*, ASCE Journal of the structural Division 107: NO.ST3 (September 1977): 1731-1738

Dougherty, B. K., *Buckling of Web Post in Perforated Beams*, ASCE Journal of the structural Division 107: NO.ST3 (March 1981): 507-19

Redwood, R. G., Hernan Baranda, and Daly, M. J. *Test of Thin-Webbed beams with Unreinforced Holes*, ASCE Journal of the structural Division 104: No.ST3 (March 1978): 577-95

Redwood, R. G., and Minoru Uenoya, *Critical Loads for Webs with Holes*, ASCE Journal of the structural Division 105: No.ST10 (October 1979): 2053-76
Darwin, D., *Steel and Composite Beams with Web*

Openings/Steel Design Guide Series 2, AISC, Inc., 1990.

(접수일자 : 2003. 3. 27 / 심사일 2003. 5. 1 /
심사완료일 2003. 6. 5)

