

L-헤더 시스템의 좌굴 거동에 관한 실험 연구

Experimental Study on the Buckling Behavior of L-Shaped Header System

박 완 순¹⁾ · 김 갑 득²⁾

Park, Wan Soon Kim, Gap Deuk

요 약 : 스틸 스티드 구조물에서 사용되고 있는 기존 I형, 박스형 헤더는 시공성, 경제성 측면에서 여러 가지 문제점을 노출하고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 선진국에서는 냉간성형강을 L형으로 절곡한 L-헤더를 활발히 사용하고 있다. 그러나 국내에서는 이에 대한 연구가 부족하여 L-헤더를 사용하지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 L-헤더에 대한 좌굴해석 및 휨 실험을 수행하였으며, 실험결과를 미국 철강협회(AISI, American Iron and Steel Institute) 설계기준과 비교하였다. 휨 실험결과 중력방향 하중이 작용하는 경우에는 국부좌굴이, 인발하중이 작용하는 경우에는 뒤틀림 좌굴이 발생하는 것으로 관찰되었다. 그리고 실험에서 측정된 좌굴하중을 비교한 결과 AISI 설계기준에 제시된 공칭하중을 상회하는 것으로 확인되었다.

ABSTRACT : The back-to-back and box-shaped headers used in light gauge steel structures have some disadvantages, i.e., construction efficiency and cost competitiveness. As such, cold-formed steel L-shaped headers have been developed and are used actively in advanced nations. However, this system has not been used in Korea because of inadequate investigation and adaptation efforts and lack of application example. Thus, this research evaluated the structural performance of L-header using buckling analyses and bending tests. Test results were compared using the AISI design criteria. Test results showed that local buckling and distortional buckling governed buckling behavior in gravity loads and uplift loads, respectively. These results were consistent with the calculated nominal strengths using the AISI design criteria.

핵심용어 : 스틸 스티드 구조물, 냉간성형강, L-헤더, 국부좌굴, 비틀림 좌굴

KEYWORDS : Light gauge steel structure, Cold-formed steel, L-header, Local buckling, Distortional buckling

1. 서론

스틸 스티드 구조물에서 사용되고 있는 I형, 박스형 헤더는 우수한 구조 성능에도 불구하고 시공이 까다롭고, 복잡하다는 문제점을 가지고 있다. 그리고 I형 헤더의 시공성이 좋기 때문에 현장에서는 박스형 헤더 대신 I형 헤더를 많이 사용하고 있는 실정이다. 그러나 I형 헤더의 경우 헤더 상부에 설치되는 트러스, 조이스트와의 접합이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 상부에 트러스나 조이스트가 설치되면 박스형 헤더를 사용해야 하지만, 박스형 헤더의 경우 시공이 상대적으로 불리하고, 단열재를 헤더 제작단계에서부터 채워주어야 한다는 문제점을 가지고 있다. 단열재의 시공은 골조시공이 완료된 후 진행되는 것이 일반적이지만, 박스형 헤더, 박스형 기둥과 같

이 폐단면으로 구성되는 구조재의 경우에는 단열재를 미리 삽입해 주어야 한다.

스틸 스티드 구조물과 경쟁관계에 있는 목구조물의 경우 목재 소재의 특성상 개구부 골조의 제작이 간단하다는 차이점을 가지고 있으며, 이러한 차이점은 스틸 스티드 공법의 경쟁력을 약화시키는 원인으로 작용하고 있는 실정이다. 개구부 골조 시공의 문제점을 극복하기 위해 미국에서는 L형 앵글을 헤더로 사용하는 방안에 대한 연구가 AISI, NAHB 주도로 1997년부터 추진되었다.^{(1),(2),(3)} L형 앵글을 헤더(이하 L-헤더)로 사용하는 방안은 California Lathrop의 Gary Johnson에 의해 처음 제안되었다. L-헤더 사용 초기에는 벽체 한쪽 측면에만 설치하는 방법, 양쪽 측면에 설치하는 방법 등이 혼용되었으며, 통일된 자재규격 및 설계기준이 없어 시

1) 정회원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 선임연구원

2) 정회원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원, 팀장

본 논문에 대한 토의를 2003년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

공현장에서 활발하게 사용되지 못하였다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 미국 AISI, NAHB는 1997년 1단계 연구, 1998년 2단계 연구를 진행하였으며, 연구결과를 토대로 2001년도에 자재규격, 설계기준, 표준 디테일, 허용스팬표를 발표하였다.^{(4),(5)} NAHB에서 발표한 자료들은 구조성능이 떨어지는 단일 L-헤더 대신 이중 L-헤더를 L-헤더의 표준으로 제시하였다는 점과, 기존 헤더의 허용스팬표에는 없던 인발하중(풍하중에 의해 유발되는 하중)에 대한 허용스팬표를 추가하였다는 점이 특징이다.

국내에서도 시공자들을 중심으로 L-헤더의 필요성이 지속적으로 제기되어 왔으나, 자재강도, 자재규격, 설계조건이 미국과 달라 NAHB 설계자료를 사용하지 못하는 문제점을 가지고 있었다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 구조실험을 통한 L-헤더의 성능검증 작업을 추진하였으며, 실험결과를 미국 AISI 설계기준과 비교하는 작업을 진행하였다.

2. L-헤더의 해석 및 설계

2.1 수치해석을 통한 좌굴특성 분석

유한대판해석 프로그램인 THIN-WALL을 사용하여 L-헤더의 좌굴거동을 분석하였다. 다음 그림은 웹 길이 30cm, 플랜지 폭 4cm L-헤더 단면에 대한 좌굴해석 결과이다.

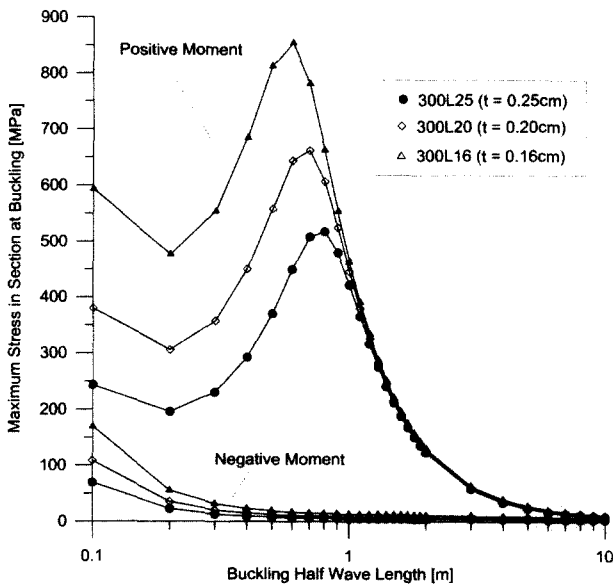


그림 1. L-헤더의 좌굴장-좌굴응력 곡선

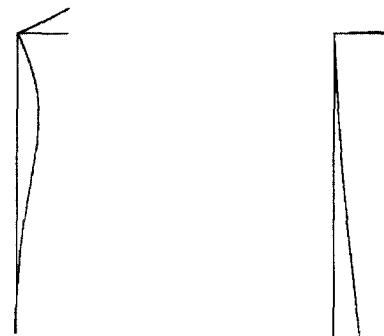
L-헤더는 별도의 보강없이 단순지지되어 있는 것으로 가정되었으며, 순수 휨 모멘트만이 작용하는 것으로 가정되었다. 두께 변화에 따른 좌굴응력의 변화를 살펴본 결과 단면이 두꺼워질수록 좌굴응력의 하한선이 높아지는 것으로 확인되었

다. 정모멘트가 작용하는 경우 좌굴장이 짧으면 단면두께에 상관없이 국부좌굴(local buckling)이 발생하면서 좌굴응력을 결정하고, 좌굴장이 길어지면 휨좌굴(flexural buckling)이 좌굴응력을 결정하는 것으로 확인되었다. 그리고 국부좌굴이 발생하는 좌굴장은 웹의 길이에 따라 달라지나 약 0.2 ~ 0.4m 근방에서 발생하는 것으로 분석되었다. 부모멘트가 작용하는 경우에는 좌굴장에 관계없이 휨좌굴이 좌굴응력을 결정하는 것으로 확인되었다.

좌굴해석을 통해 정모멘트와 부모멘트에 대한 좌굴응력을 비교한 결과 부모멘트에 대한 좌굴응력이 정모멘트에 대한 좌굴응력 보다 매우 작다는 특징도 확인되었다. L-헤더 단면이 X, Y축에 대해 비대칭이기 때문에 좌굴거동뿐만 아니라 좌굴응력이 차이가 나고, 좌굴거동도 달라지는 것으로 판단되었다.

부모멘트의 좌굴하중이 상대적으로 낮다는 의미는 L-헤더 설계의 중요한 제약조건이며, 이것은 L-헤더를 단순보로만 사용할 수 있고, 지점부에 부모멘트가 작용하는 연속보로는 사용할 수 없다는 것을 의미한다. 결국 L-헤더는 개구부에 단순보 형식으로 설치되어야 하며, 두 개 이상의 개구부를 지지하거나 여러 개의 스택 기둥을 지지하기 위해 사용하면 문제가 있다는 사실을 수치해석을 통해 예측할 수 있었다.

다음 그림은 수치해석을 통해 얻어진 300L25 L-헤더의 좌굴형상이다. 정모멘트에 대한 국부좌굴모드는 절곡부를 중심으로 플랜지와 웹이 변형되는 형태로 나타나며, 부모멘트에 대한 뒤틀림 좌굴모드는 플랜지의 변형없이, 웹 만이 변형되는 형태로 나타난다. 웹 만이 비틀리면 탄성한도가 정모멘트 작용시 보다 증가될 수 있음을 의미하는 것으로 보다 자세한 내용은 인발하중에 대한 실험결과 부분에서 다루어 질 것이다.



(a) 정모멘트 작용시 (b) 부모멘트 작용시

그림 2. 정/부모멘트 작용에 따른 L-헤더의 좌굴형상

2.2. AISI 설계기준⁽⁵⁾

AISI 설계기준에서 부모멘트에 대한 공칭모멘트는 정모멘

트에 대한 공칭모멘트를 기준으로 계산하도록 규정되어 있다. 정모멘트에 대한 공칭모멘트는 항복응력에 대한 유효단면을 기준으로 계산하되, '부재 길이/웹브 길이' 비율에 따라 적절히 조절하는 방식으로 계산되며, 부모멘트는 '웹브 길이/헤더 두께' 비율에 따라 정모멘트에 대한 공칭모멘트를 저감하는 방식으로 계산된다. 항복응력에 대한 유효단면은 자재의 형상 및 하중 작용방향에 따라 달라지게 되며, L-헤더의 경우 정모멘트 작용시 플랜지와 웹브 끝단이 항복응력 상태에 도달한다는 가정 하에 유효단면을 계산하도록 규정되어 있다.

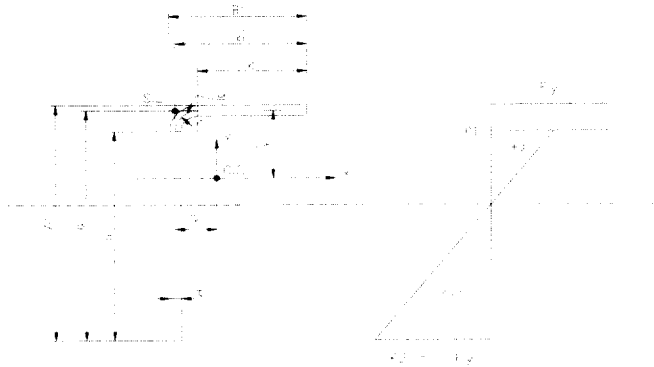


그림 3. L-헤더 단면 및 응력분포

· 중력방향 하중에 대한 공칭모멘트

a) 웹브 길이 $A' \leq 203 \text{ mm}$

$$M_{ng} = S_{ec} F_y$$

여기서, $F_y =$ 설계에 사용되는 항복강도

$S_{ec} =$ 유효단면의 탄성단면계수로서, 유효단면은 단면 끝단에 항복강도가 작용하는 것으로 보고 결정됨

b) 웹브 길이 $A' > 203 \text{ mm}$,

부재길이 L_h / 웹브 길이 $A' \geq 10$

$$M_{ng} = S_{ec} F_y$$

c) 웹브 길이 $A' > 203 \text{ mm}$,

부재길이 L_h / 웹브 길이 $A' < 10$

$$M_{ng} = 0.9 S_{ec} F_y$$

· 인발하중에 대한 공칭모멘트

$$M_{nu} = R M_{ng}$$

여기서, $M_{ng} =$ 중력방향 하중에 대한 공칭모멘트

$R =$ 하중저감계수

$$= 0.25 \quad (A'/t \leq 150)$$

$$= 0.20 \quad (A'/t \geq 170)$$

$=$ 선형보간값 ($150 < A'/t < 170$)

$A' =$ 웹브 길이

$t =$ 부재 두께

· 허용모멘트

a) 중력방향 하중 작용시

$$M_a = M_{ng} / \Omega$$

여기서, $\Omega = 1.67 \quad (A' \leq 203 \text{ mm})$

$\Omega = 2.26 \quad (A' > 203 \text{ mm})$

b) 인발하중 작용시

$$M_a = M_{nu} / \Omega$$

여기서, $\Omega = 2.0$

L-헤더 연구 초기에는 L-헤더의 구조성능에 대한 판단과, 웹브 크리플링, 국부좌굴의 영향에 대해 논란이 많았으나, 다수의 실험을 통해 판단과 및 웹브 크리플링이 L-헤더의 성능에 영향을 미치지 않는다는 사실과 국부좌굴은 가력점에 크리플 스티드를 설치하는 것으로 해결할 수 있다는 사실이 확인되었다. 이러한 연구결과를 바탕으로 AISI 설계기준도 L-헤더 설계 시 판단과와 웹브 크리플링을 고려할 필요가 없는 것으로 규정하고 있다.

· L-헤더 설계시 고려되지 않는 강도

a) 허용전단력

b) 웹브 크리플링 강도

c) 휨 모멘트와 전단력의 상관관계

d) 휨 모멘트와 웹브 크리플링 강도의 상관관계

3. L-헤더의 구조실험

3.1 실험개요

본 연구에서는 수치해석 및 AISI 설계기준으로 검토한 L-헤더의 성능을 검증하기 위해 휨 실험을 실시하였다. 휨 실험은 중력방향 가력시험, 인발시험으로 나뉘어져 진행되었으며, 실험결과와 분석은 수치해석을 통해 얻어진 좌굴모드와 시험체의 좌굴양상을 비교하고, 좌굴하중과 설계하중을 비교하는 형태로 진행되었다.

3.2 실험방법

중력방향 가력실험은 1점 가력과 2점 가력으로 구분하여

진행되었다. 1점 가력시 가력지점은 시험체의 정중앙, 2점 가력시 가력지점은 시험체가 3등분되는 지점에 위치시켰다. 1점 가력은 시험체 길이가 1.2m 인 시험체를 대상으로 진행되었으며, 2점 가력은 시험체 길이가 2.7m, 3.6m 인 시험체를 대상으로 진행되었다. 길이 1.2m 인 시험체에는 웨브 길이가 짧은 L-헤더(웨브 길이 15cm, 18cm)가 적용되었다. 웨브 길이가 짧은 경우 장스팬 개구부에 사용되는 것 보다 단스팬 개구부에 사용되는 경우가 많기 때문에 시험체 길이도 짧게 해주었다.

시험체 하부에는 고정용 보를 설치하고, 고정용 앵글을 이용하여 시험체와 고정용 보를 연결하였다. 고정용 보와 앵글은 볼트로 연결하고, 시험체와 앵글은 직경 4.8mm 육각 스크류로 연결하였다.

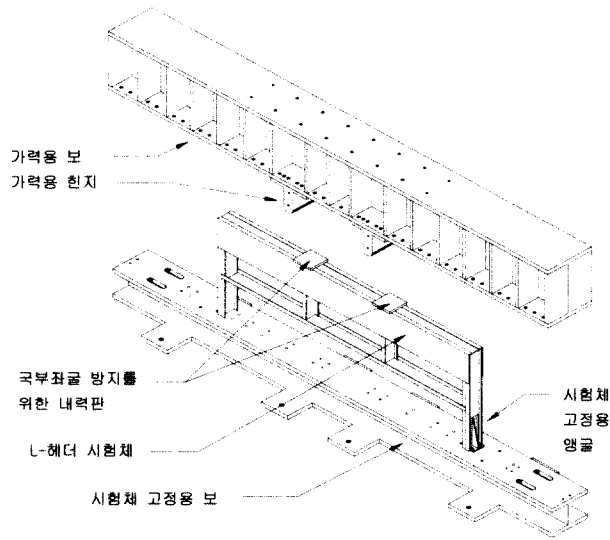


그림 4. 중력방향 하중 가력실험

시험체의 가력은 가력용 보에 설치된 힌지를 통해 시험체를 아래로 누르는 방식으로 진행되었으며, 시험체와 힌지가 만나는 부분에는 국부좌굴이 발생되지 않도록 20cm x 20cm x 2cm 내력판을 설치하였다.

가력실험에 사용된 기계는 300톤 UTM 이며, 가력방법은 변위제어 방식을 택하였으며, 가력속도는 0.1mm/sec 로 설정하였다. 시험 데이터의 측정은 데이터 로거를 이용하였다. 시험체의 수직방향 변위를 측정할 수 있도록 시험체 중앙, 헤더 트랙 하부에 시험체와 직각방향으로 50cm 길이의 스티드를 설치한 후 스티드 양단에서 5cm 안쪽으로 떨어진 위치에 변위계를 설치하였다. 시험체의 변위는 양쪽 변위계의 변위를 평균하는 방식으로 측정하였다.

인발실험도 중력방향 가력실험과 같이 1점 가력과 2점 가력으로 구분하여 진행되었다. 인발실험이 필요한 이유는 L-헤더가 지붕 트러스와 연결되어 있는 상태에서 일정 속도 이

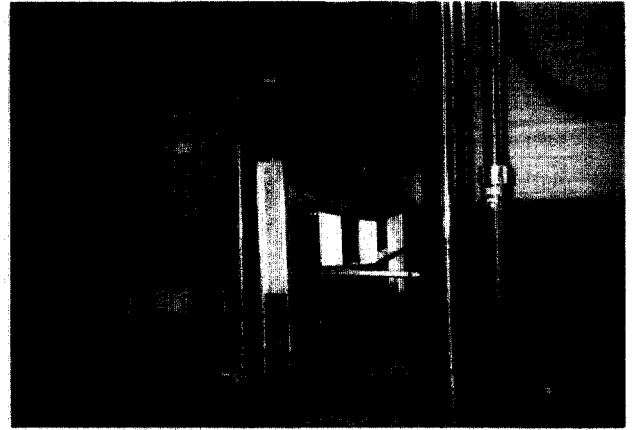


그림 5. 변위계 설치위치

상의 바람이 불면 L-헤더에 인발하중이 작용하기 때문이다. 1점 가력은 웨브 길이가 짧은 15cm 시험체에 대해 진행되었으며, 2점 가력은 웨브 길이 18cm, 24cm, 30cm 시험체에 대해 진행되었다.

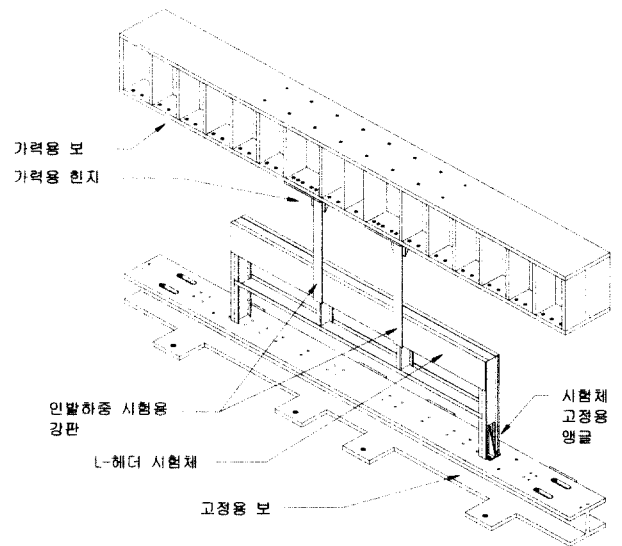


그림 6. 인발하중 가력실험

시험체는 중력방향 가력실험과 동일하게 앵글을 이용하여 고정용 보에 고정되었으며, 시험체의 가력은 가력용 힌지와 시험체를 폭 15cm x 두께 0.1cm 강판으로 연결한 후 강판을 위로 잡아당기는 방식으로 진행되었다. 힌지, 시험체와 강판의 고정에는 직경 4.8mm 육각 스크류가 사용되었다.

인발실험에서도 중력방향 가력실험과 동일한 장비가 사용되었으며, 동일한 가력속도가 적용되었다. 시험체의 변위도 중력방향 가력실험과 동일한 방식으로 측정되었다.

L-헤더 시험체의 제원은 다음 그림들과 같다. 시험체 양단에는 두 개의 150SL12 스티드가 킹 스티드로 설치되었고, 킹스티드와 크리플 스티드 상부에는 150TC12 트랙이 설치되었다.

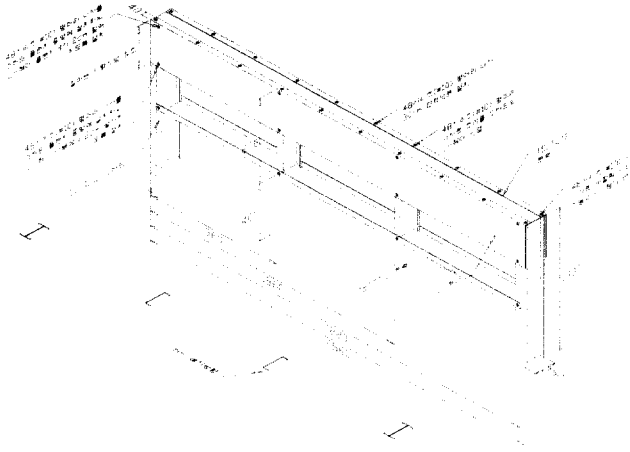


그림 7. L-헤더 시험체

L-헤더 시험체는 시험체 전면, 후면에 한 개씩 설치되어 이중 L-헤더로 구성되었다. 크리플 스티드는 L-헤더의 횡좌굴을 방지할 수 있도록 가력점에 맞춰 배치되었으며, L-헤더 웹에는 직경 4.8mm 평머리 나사가 킹 스티드와 크리플 스티드 위치에 맞춰 두 개씩 체결되었고, 플랜지에는 직경 4.8mm 평머리 나사가 30cm 간격으로 체결되었다.

표 1. L-헤더 시험체의 물리적, 기계적 특성

구분	두께 (mm)	평균 항복강도 (MPa)	평균 인장강도 (MPa)	연신율 (%)
300L16	1.6	350	460	33
300L20	2.0	314	426	36
240L16	1.6	350	460	33
240L20	2.0	314	426	36
180L12	1.2	326	474	33
180L16	1.6	350	460	33
150L12	1.2	326	474	33

가력실험에 사용된 L-헤더 시험체의 물리적, 기계적 특성은 상기 표와 같으며, POSCO 냉연코일의 Mill Test Certificate를 근거로 산정되었다.

중력방향 가력실험에 사용된 시험체의 제원 및 가력조건은 다음과 같다. 중력방향 가력실험의 경우에는 길이 1.2m, 2.7m, 3.6m 시험체가 사용되었으며, 웹 길이에 따라 시험체의 길이도 조정되었다. 시험체는 동일한 실험을 2회 실시한다는 가정 하에 2개씩 제작되었다.

인발시험에 사용된 시험체의 제원 및 가력조건은 다음과 같다. 인발시험의 경우 중력방향 가력실험과 달리 1.2m, 2.7m 시험체만이 사용되었다. 시험체 개수가 적은 이유는 인

표 2. 중력방향 하중에 대한 L-헤더 시험체의 제원 및 가력조건

구분	웹 (cm)	플랜지 (cm)	두께 (mm)	개구부 너비 (cm)	트랙 두께 (mm)	시험체 개수	가력 조건
300L16	30.0	4.0	1.6	270.0	1.2	2	2
300L16	30.0	4.0	1.6	360.0	1.2	2	2
300L20	30.0	4.0	2.0	360.0	1.2	2	2
240L16	24.0	4.0	1.6	270.0	1.2	2	2
240L16	24.0	4.0	1.6	360.0	1.2	2	2
240L20	24.0	4.0	2.0	360.0	1.2	2	2
180L12	18.0	4.0	1.2	120.0	1.2	2	1
180L12	18.0	4.0	1.2	270.0	1.2	2	2
180L16	18.0	4.0	1.6	270.0	1.2	2	2
150L12	15.0	4.0	1.2	120.0	1.2	2	1

발실험이 중력방향 하중에 대한 공칭모멘트를 저감시켜 사용하는 AISI 설계기준을 검증하는 차원에서 진행되었기 때문이다.

표 3. 인발하중에 대한 L-헤더 시험체의 제원 및 가력조건

구분	웹 (cm)	플랜지 (cm)	두께 (mm)	개구부 너비 (cm)	트랙 두께 (mm)	시험체 개수	가력 조건
300L16	30.0	4.0	1.6	270.0	1.2	2	2
240L16	24.0	4.0	1.6	270.0	1.2	2	2
180L12	18.0	4.0	1.2	270.0	1.2	2	2
150L12	15.0	4.0	1.2	120.0	1.2	2	1

3.3 실험결과

3.3.1 중력방향 가력실험

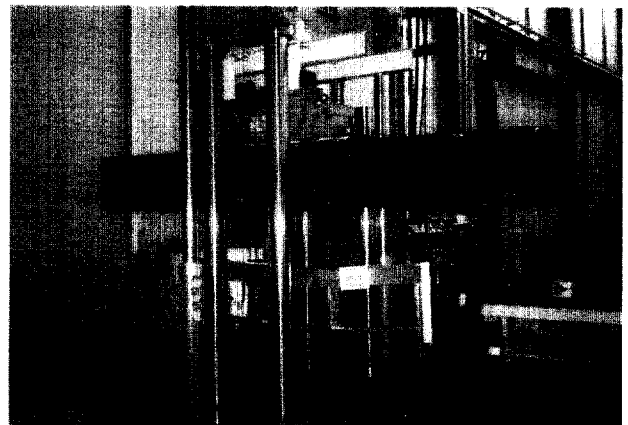


그림 8. 중력방향 하중에 대한 실험 전경

중력방향 가력실험의 결과 다음과 같이 가력점 또는 시험체 중앙에서 좌굴이 발생되는 것으로 확인되었다.

표 4. 시험체 종류별 좌굴발생 위치

구 분	웹브길이/ 두께	가력점 거리/ 웹브 길이	가력조건	좌굴발생 위 치
300L16-2.7M-#1	18.75	9.00	2	시험체 중앙
300L16-2.7M-#2	18.75	9.00	2	가력점
300L16-3.6M-#1	18.75	12.00	2	가력점
300L16-3.6M-#2	18.75	12.00	2	가력점
300L20-3.6M-#1	15.00	12.00	2	시험체 중앙
300L20-3.6M-#2	15.00	12.00	2	가력점
240L16-2.7M-#1	15.00	11.25	2	시험체 중앙
240L16-2.7M-#2	15.00	11.25	2	가력점
240L16-3.6M-#1	15.00	15.00	2	시험체 중앙
240L16-3.6M-#2	15.00	15.00	2	시험체 중앙
240L20-3.6M-#1	12.00	15.00	2	가력점
240L20-3.6M-#2	12.00	15.00	2	시험체 중앙
180L12-1.2M-#1	15.00	6.67	1	시험체 중앙
180L12-1.2M-#2	15.00	6.67	1	시험체 중앙
180L12-2.7M-#1	15.00	15.00	2	가력점
180L12-2.7M-#2	15.00	15.00	2	가력점
180L16-2.7M-#1	11.25	15.00	2	시험체 중앙
180L16-2.7M-#2	11.25	15.00	2	시험체 중앙
150L12-1.2M-#1	12.50	8.00	1	시험체 중앙
150L12-1.2M-#2	12.50	8.00	1	시험체 중앙

2점 가력의 경우 가력점에서 발생하는 좌굴은 양쪽 가력점에서 동시에 발생하는 것이 아니라 한쪽 가력점에서 먼저 발생된다는 사실도 확인되었다.

실험 초기에는 시험체를 잘못 설치하여 한쪽 가력점이 먼저 좌굴되는 것으로 생각하였으나 다수의 시험체에서 동일한 현상이 지속적으로 나타난다는 사실이 확인되면서 L-헤더의 경우 가력점이 중요한 좌굴발생 지점이라는 사실을 알게 되었다. 이러한 결과는 L-헤더의 보강을 위해 설치되는 크리플 스티드의 필요성을 입증해주고 있다.

시험체 중앙부에서 발생하는 좌굴은 '웹브 길이/두께' 비율이 낮고, '가력점 거리/웹브 길이' 비율이 큰 경우 나타나는 것으로 확인되었다. 그러나 동일한 사양의 시험체에서도 어떤 경우에는 가력점에서, 다른 경우에는 시험체 중앙부에서 좌굴이 발생되었기 때문에 좌굴발생 위치에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

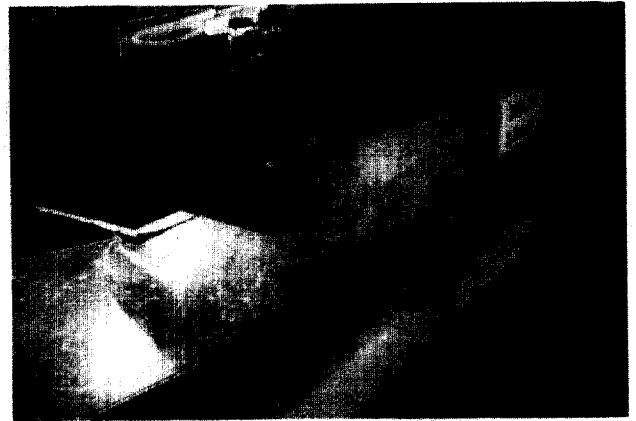


그림 9. 가력점에서 발생하는 좌굴

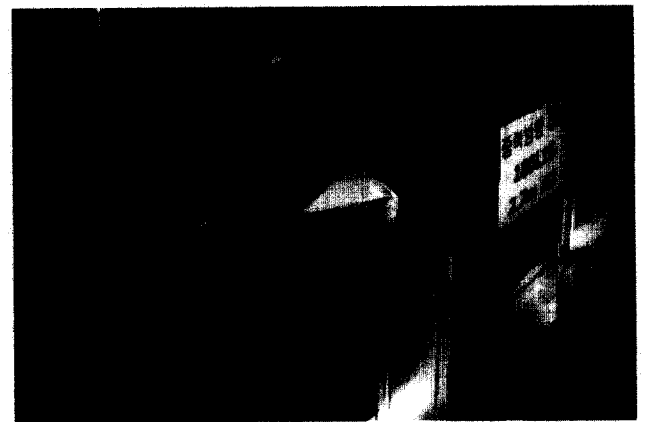


그림 10. 시험체 중앙부에서 발생하는 좌굴

시험체의 좌굴형상을 관찰한 결과 좌굴발생 위치에 상관없이 절곡부를 중심으로 플랜지와 웹브가 변형되는 형태로 좌굴이 발생되는 것으로 확인되었다.

하중-변위 곡선을 분석한 결과 동일 사양의 시험체들은 서로 유사한 하중-변위 관계를 나타내는 것으로 확인되었다. 다음 그림은 동일사양에 대해 2회씩 실시한 실험 중 두 번째 실험결과(#2)를 비교한 것이다. 하중-변위 곡선을 살펴보면 두께가 비교적 두꺼운 경우 웹브 길이가 길어질수록 비례한계가 급격히 증가하고 탄성구간이 작아진다는 사실을 확인할 수 있다.

그러나, 두께가 얇으면 웹브 길이의 증가에 따라 다음 그림과 같이 비례한계는 증가하나 탄성구간은 일정하게 유지된다는 사실을 확인할 수 있다.

중력방향 가력실험을 통해 L-헤더의 파손에는 웹브 크리플링, 전단파괴, 스크류 파손이 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 웹브 크리플링과 전단파괴 현상은 관찰되지 않았으며, 스크류들은 좌굴 후 증가되는 시험체의 변위를 감당하지 못하고 파손되는 것으로 확인되었다.

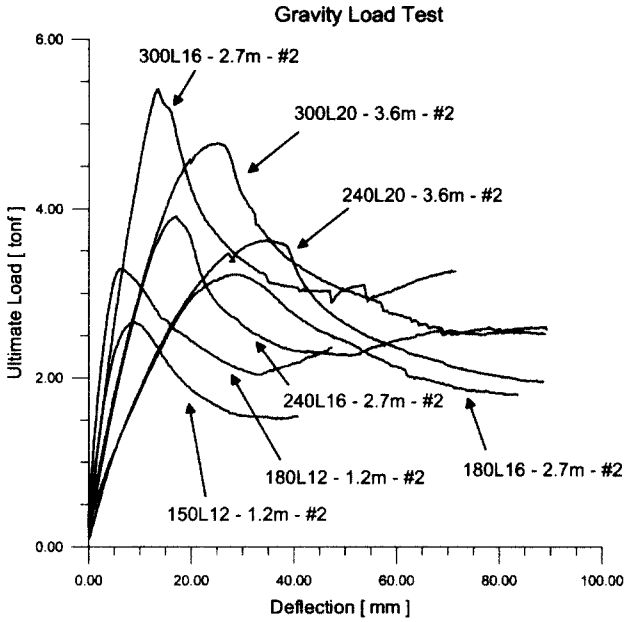


그림 11. 시험체 종류별 하중-응력 곡선

3.3.2 인발실험

인발실험은 중력방향 가력실험과는 상이한 결과를 보여주었다. 인발하중이 작용하면 가력점들을 중심으로 킹 스티드와 가력점, 가력점과 가력점 사이의 거리를 좌굴장으로 하는 좌굴이 발생되는 것으로 확인되었다. 그리고 좌굴이 발생된 후 하중을 제거하면 웹 단부에 약간의 잔류변형만 남긴 채 원래의 형상으로 되돌아오는 현상이 확인되었다. 중력방향 가력 실험에서는 좌굴 발생 후 하중을 제거하면 원래의 형상으로 되돌아오지 않았으나 인발실험에서는 탄성거동의 전형적인 형태를 보여 주는 것으로 확인되었다.

이러한 거동은 풍하중에 대한 L-헤더의 안정성을 보여주는 것으로 풍하중이 작용하여 L-헤더가 변형되더라도 풍하중이 사라지면 곧바로 회복될 수 있다는 것을 의미한다. 실제 설계에서는 풍하중에 의한 변형이 발생되지 않도록 충분한 안전을

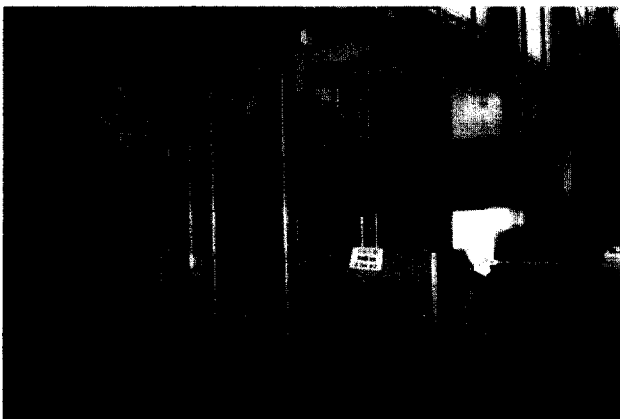


그림 12. 인발하중에 대한 실험 전경

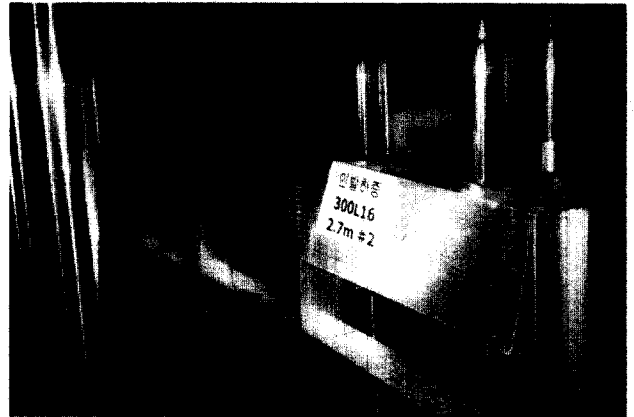


그림 13. 길이 2.7m 시험체의 좌굴형상



그림 14. 길이 1.2m 시험체의 좌굴형상

이 주어지겠으나 예기치 못한 최악의 조건에서도 상당한 신뢰성을 가질 수 있음을 인발실험을 통해 확인할 수 있었다.

인발실험의 결과 L-헤더의 좌굴하중에는 스크류의 파손이 중요한 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 하중-변위 곡선을 살펴보면 킹 스티드에 접합된 스크류가 파손되면서 하중이 급격히 감소했다가 다른 스크류가 파손될 때까지 다시 하중이 증가하는 것으로 확인되었다. 스크류의 파손은 반력이 작용하는 킹 스티드 접합부에서 집중적으로 나타났으며, 트랙과 L-헤더 플랜지가 접합된 부분에서는 스크류 파손이 관찰되지 않았다.

시험체의 사양이 동일하다고 하더라도 하중-변위 곡선은 상당한 편차를 나타낸다는 사실도 확인되었다. 이러한 편차가 발생하는 원인은 스크류 파손시점 및 파손위치가 달라지기 때문인 것으로 분석되며, 시험체 제작 시 체결되는 스크류의 위치가 정확하지 않고 스크류 강도의 차이도 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 하중-변위 곡선을 자세히 살펴보면 스크류 파손시점과 최대 좌굴강도 발생시점이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 스크류의 파손을 기점으로 다음번 스크류들이 파손될 때마다 강도가 점차 감소하는 것을 알 수 있다.

웹 길이 변화가 좌굴 거동에 미치는 영향을 살펴보면 웹 길이에 관계없이 일정한 탄성영역을 가지는 것으로 판단된다.

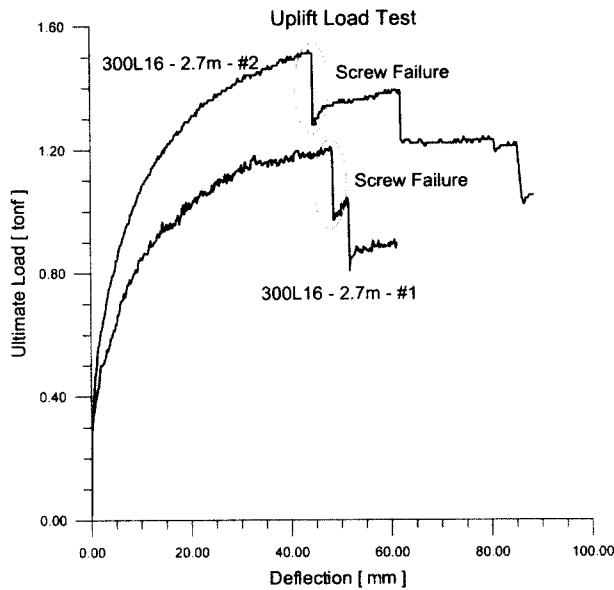


그림 15. 300L16, 길이 2.7m 시험체의 하중-변위곡선

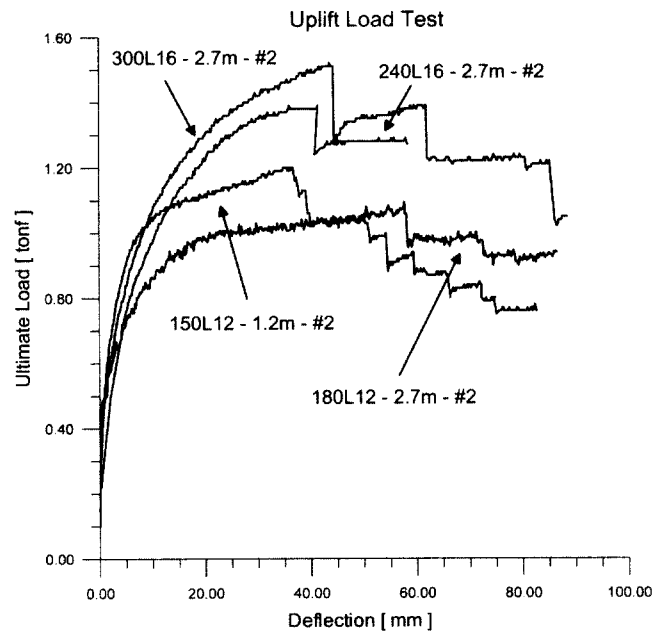


그림 16. 시험체 종류별 하중-응력 곡선

표 5. 중력방향 하중에 대한 실험결과

구 분	개구부 너 비 (L_h) / 웹 길 이 (A')	측정값		설계값		실험값/ 설계값 M_t/M_{np}
		좌굴 하중 P_{ul} (kN)	좌 굴 모멘트 M_t (kN·m)	공칭 하중 P_{np} (kN)	공 칭 모멘트 M_{np} (kN·m)	
300L16-2.7M-#1	9.0	55.03	24.77	43.36	19.51	1.27
300L16-2.7M-#2	9.0	53.07	23.88	43.36	19.51	1.22
300L16-3.6M-#1	12.0	40.12	24.07	36.13	21.68	1.11
300L16-3.6M-#2	12.0	42.48	25.49	36.13	21.68	1.18
300L20-3.6M-#1	12.0	48.36	29.02	42.62	25.58	1.13
300L20-3.6M-#2	12.0	46.79	28.08	42.62	25.58	1.10
240L16-2.7M-#1	11.3	45.03	20.26	32.54	14.65	1.38
240L16-2.7M-#2	11.3	38.36	17.26	32.54	14.65	1.18
240L16-3.6M-#1	15.0	33.35	20.01	24.41	14.65	1.37
240L16-3.6M-#2	15.0	32.37	19.42	24.41	14.65	1.33
240L20-3.6M-#1	15.0	35.22	21.13	29.05	17.43	1.21
240L20-3.6M-#2	15.0	35.61	21.37	29.05	17.43	1.23
180L12-1.2M-#1	6.7	30.21	9.06	19.57	5.87	1.54
180L12-1.2M-#2	6.7	32.27	9.68	19.57	5.87	1.65
180L12-2.7M-#1	15.0	22.86	10.29	13.05	5.87	1.75
180L12-2.7M-#2	15.0	22.96	10.33	13.05	5.87	1.76
180L16-2.7M-#1	15.0	32.96	14.83	19.89	8.95	1.66
180L16-2.7M-#2	15.0	31.59	14.21	19.89	8.95	1.59
150L12-1.2M-#1	8.0	25.02	7.50	14.33	4.30	1.74
150L12-1.2M-#2	8.0	26.09	7.83	14.33	4.30	1.82

3.4 결과분석

중력방향 가력실험에서 얻어진 좌굴 모멘트(M_t)와 AISI 설계기준에 맞춰 계산된 공칭모멘트(M_{np})를 비교한 결과는 다음과 같다.

실험값과 설계값을 비교해보면 300L, 240L 시리즈 L-헤더들은 실험값이 설계값 보다 평균 23% 크게 나타나고, 180L, 150L 시리즈 L-헤더들은 실험값이 설계값 보다 평균 69% 크게 나타나는 것으로 분석된다.

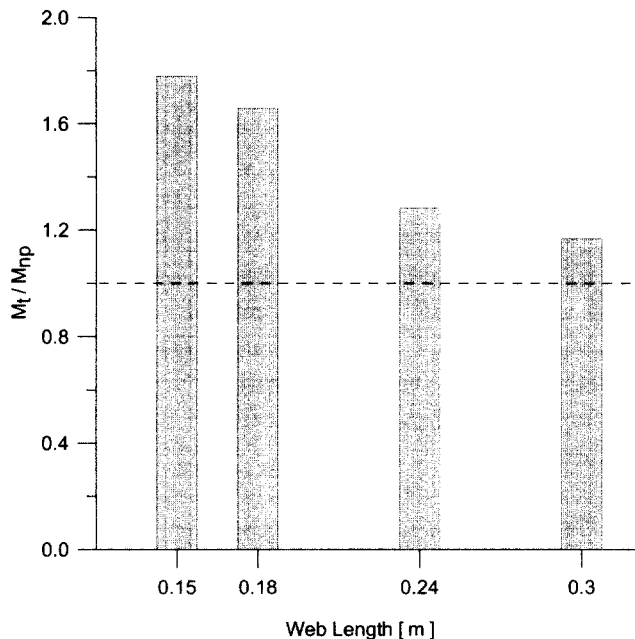


그림 17. 중력방향 하중에 대한 설계값과 실험값의 비교결과

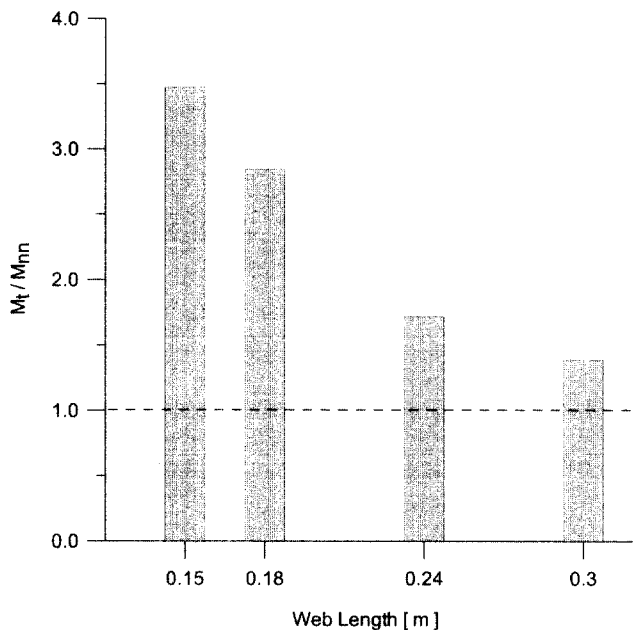


그림 18. 인발하중에 대한 설계값과 실험값의 비교결과

인발실험에서 얻어진 좌굴 모멘트(M_t)와 AISI 설계기준에 맞춰 계산된 공칭모멘트(M_{nn})를 비교한 결과는 다음과 같다.

표 6. 인발하중에 대한 실험결과

구 분	웨 브 길 이 / 단 면 두께 (A') (t)	측정값		설계값		실험값/ 설계값 M_t/M_{nn}
		좌굴 하중 P_{ui} (kN)	좌 굴 모멘트 M_t (kN·m)	공칭 하중 P_{nn} (kN)	공 칭 모멘트 M_{nn} (kN·m)	
300L16-2.7M-#1	187.5	11.87	5.34	9.63	4.34	1.23
300L16-2.7M-#2	187.5	14.91	6.71	9.63	4.34	1.55
240L16-2.7M-#1	150.0	14.32	6.45	8.13	3.66	1.76
240L16-2.7M-#2	150.0	13.64	6.14	8.13	3.66	1.68
180L12-2.7M-#1	150.0	7.85	3.53	3.26	1.47	2.41
180L12-2.7M-#2	150.0	10.69	4.81	3.26	1.47	3.28
150L12-1.2M-#1	125.0	13.15	3.94	3.58	1.08	3.67
150L12-1.2M-#2	125.0	11.77	3.53	3.58	1.08	3.28

실험값과 설계값을 비교해보면 300L, 240L 시리즈 L-헤더들은 실험값이 설계값 보다 평균 56% 의 크게 나타나고, 180L, 150L 시리즈 L-헤더들은 실험값이 설계값 보다 평균 216% 크게 나타나는 것으로 분석된다.

4. 결 론

중력방향 가력실험, 인발실험 결과 웨브 길이가 길어질수록 실험값이 설계값에 근접하고, 웨브 길이가 짧을수록 실험값이 설계값 보다 높아진다는 사실을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 웨브 길이가 짧아질수록 항복응력 상태에 도달하는 웨브 단면이 증가하기 때문인 것으로 파악된다. 실제로 유효 단면을 계산해보면 웨브 길이가 짧아질수록 순단면에 대한 손실률이 감소한다는 것을 알 수 있다.

결론적으로 AISI 설계기준을 L-헤더 설계에 적용하는데는 문제가 없으며, 다만 웨브 길이가 짧은 경우 과다설계의 문제가 제기될 수 있을 것으로 판단된다. 현재 제시되어 있는 AISI 설계기준은 '개구부 길이/웨브 길이', '웨브 길이/헤더 두께' 비율에 따라 공칭모멘트를 저감시키는 실험식을 사용하고 있어 정확한 성능예측에 다소 무리가 있는 것으로 판단된다.

L-헤더의 성능을 정확히 예측하기 위해서는 L형 앵글의 좌굴 후 거동 및 좌굴계수에 대한 이론이 정립되어야 할 것으로 판단되나, L형 앵글의 경우 비대칭 단면이기 때문에 이론 정립에 상당한 시간이 필요할 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서 확인되었듯이 인발하중에 대한 L-헤더의 좌굴강도는 스크류의 파손과 직접적인 연관관계를 가지기 때문에 이에 대한 추가적인 연구도 필요할 것으로 판단된다.

그러나 AISI 설계기준은 충분한 안전율을 가지고 있기 때문에 설계실무에 적용하는데는 문제가 없을 것으로 판단되며, 고강도 자재에 대해서도 신뢰성 있는 설계치를 제공할 수 있

을 것으로 예상된다.

그리고 가력실험을 통해 L-헤더를 구조재로 사용하기 위해서는 가력지점에 크리플 스티드를 설치하는 것이 필요하며, 스크류의 역할이 예상보다 중요하지 않다는 사실도 확인되었다. 이러한 특징들은 비대칭 박판구조재인 L-헤더의 시공방법을 알려주는 중요한 단서로서 향후 설계자료 및 표준디테일 개발에 반영되어야 할 사항으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. National Association of Home Builders, NAHB Research Center, Upper Marlboro, MD, "L-Shpaed Header Testing and Evaluation, Final Report, Prepared for the American Iron and Steel Institute Cost Reduction Subcommittee of Residential Advisory Group", September, 1997
2. National Association of Home Builders, NAHB

- Research Center, Upper Marlboro, MD, "L-Shaped Header Testing, Evaluation, & Design Guidance. Prepared for the American Iron and Steel Institute Cost Reduction Subcommittee of Residential Advisory Group", July, 1998
3. N. R. Elhajj and R.A. LaBoube, "L-header Testing Evaluation and Design Methodology", Fifteenth International Specialty Conference on Cold- Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri U.S.A, October 19-20, 2000
4. American Iron and Steel Institute, "Standard for Cold-formed Steel Framing Header Design", July, 2001
5. North American Steel Framing Alliance, "Prescrip-tive Method for Residential Cold-formed Steel framing, Year 2000 Endition", 2000

(접수일자 : 2002년 6월 4일)