신형상 아연도강판 영구거푸집 보의 전단성능평가

Shear Performance Evaluation of New Permanent Formed Galvanized Steel Beams

김진석* · 최영한** · 김상모*** · 김상섭****

Kim, Jinseok*, Choi, Younghan**, Kim, Sangmo***, and Kim, Sangseup****

Abstract

In this study, a new type of permanent formed galvanized steel beams fabricated from thin steel plates was developed for improving constructability in reinforced concrete construction sites. The proposed beam employs a set of ribs a set of ribs attached to the side for shear reinforcement; thus the need for installing stirrups at the construction site is avoided. Herein, tests were conducted on ten specimens, and the shear tests result indicated that the ribs fabricated from steel plates increased the shear strength to a value greater than that achieved via conventional reinforced concrete stirrups. However, the shear performance of the rib was affected by the strength of the rib joint. Therefore, if the rib notch is reduced and the quality management of the rib welding is thoroughly controlled, the ribs of the proposed beam have the potential to replace the rebar stirrup.

Key words : Galvanized Steel Plate, Permanent Formed Beam, Rib, Shear Performance

요 지

이 연구는 철근콘크리트 공사에서 시공상 향상을 위하여 얇은 강판으로 제작한 신형상 아연도강판 영구거푸집보를 개발하였다. 영구거푸집보는 거푸집에 부착된 리브를 전단보강재로 사용하기 때문에 공사장에서 스티럽을 설치하는 과정이 생략된다. 이 연구는 10개의 실험체를 제작하여 휨실험을 진행했다. 실험결과 강판을 절곡한 리브가 기존 철근콘크리트보의 스티럽보다 우수한 전단성능을 보였으나, 이는 리브 이음부의 강도에 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 따라서 리브 절곡부의 노치를 줄이고 리브 단절부 용접의 품질관리를 철저히 한다면, 거푸집의 리브가 철근 스티럽을 대신할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 아연도강판, 영구거푸집보, 리브, 전단성능

1. 서 론

현대건축에 있어서 철근콘크리트구조는 철골구조와 더불어 가장 대표적인 건축구조방식이며, 건설기술의 꾸준한 발전에도 불구하고 철근콘크리트 공법은 경제성이 높다는 이점으로 인해 많은 현장에서 사용되고 있다. 그러나, 타

공종기술의 기술적 진보에 비하여 거푸집공사는 각종 시방서 및 기술지침에서 구조체가 아닌 가설재로서 분류되어 왔다. 따라서 거푸집공사의 중요성이 간과되어 왔으며, 조립 및 해체에 의한 전용의 일반적 수준에 머물러있다(Chae et al., 1997; Oh et al., 2017).

또한, 최근 인건비 상승에 따른 노무비의 상승으로 인한

*정회원, 한국기술교육대학교 건축공학과 석사과정(E-mail: kimjswlstjr@koreatech.ac.kr)

Member, Master's Candidate, Department of Architectural Engineering, Koreatech University

**한국기술교육대학교 한국기술교육대학교 건축공학과 박사과정

Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering, Koreatech University

*** (주)반석구조엔지니어링 대표이사 건축구조기술사 공학박사

Ph.D. of Engineering, CEO of BSTCOREA Engineering, Professional Engineer Architectural Structures

****교신저자, 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학과 교수(Tel: +82-41-560-1330, Fax: +82-41-560-1224, E-mail: kimss@kut.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Architectural Engineering, Koreatech University

거푸집 설치 등의 가설공사 비용이 크게 증가하고 있으며, 그에 따른 공사원가 상승과 생산성 저하가 철근콘크리트구조에 어려움으로 작용하고 있다. 이러한 어려움을 타개하기 위하여 다방면에서 기술개발을 추구하고 있으며, 그 가운데 시공의 과학화를 통한 생산성 향상이 가능한 공사로서, 거푸집공사 관련기술 개발의 필요성이 증대되고 있다(Kim and Jung, 2002; Kim et al., 2008).

기존의 RC보의 경우 거푸집 제작 및 설치, 동바리 설치 및 해체와 같이 많은 가설공사를 필요로 하며 이는 소요되는 시간과 비용의 증가를 초래한다(Kim et al., 1999).

본 연구에서는 기존의 철근콘크리트 공법이 내재하고 있는 이 같은 문제점을 극복하기 위하여 거푸집과 철근을 공장에서 미리 조립하여 현장으로 운반하는 신형상 아연도강판 영구거푸집을 개발하였다. 제안된 공법에서는 박판의 강재거푸집을 적극 활용하여 경제성을 도모하였고, 철근을 공장에서 선조립·제작하고, 이를 거푸집에 고정하여 현장에서 배근작업 및 거푸집 가설작업을 최대한 생략할 수 있도록 고안하였다.

현장에서는 양중 및 설치와 동시에 타설이 가능하며, 공기 단축, 공사비절감, 안전사고 최소화, 품질의 표준화를 실현할 수 있다. 따라서, 본 연구는 기존의 철근콘크리트 공법의 시공성을 향상시킨 신형상 아연도강판 영구거푸집 보의 전단성능 평가 및 검증을 목적으로 한다.

2. 실험개요

2.1 실험체 제작

신형상 아연도강판 영구거푸집은 Fig. 1과 같이 0.5 mm 박판의 아연도강판 거푸집과 스티럽 역할을 하는 리브로 구성되어 있다. 아연도강판 거푸집에 아연도강판(0.8 mm 및 1 mm)을 절곡해 제작한 리브를 부착하여 모듈로 제작하였다. 제작된 거푸집 모듈을 볼트로 접합하여 보의 길이를 늘릴 수 있다. 신형상 아연도강판 영구거푸집의 거푸집에는 SGC560Y (0.5 mm) 강재를 사용하였으며, 리브에는 SGCD1 (1 mm), SGCC (0.8 mm) 강재를 사용하였다.

Fig. 1. New-type Permanent form of Galvanized Steel Plates

Ra형 실험체의 앵글(L-25 × 25 × 1.2)에는 SGCC (1.2 mm) 강재를 사용하였으며, A형 실험체의 앵글(L-50 × 50 × 6)에

는 SS275 (6 mm) 강재를 사용하였다. 또한 인장, 압축 철근(HD22) 및 전단 철근(HD10)에는 SD400 철근을 사용하였으며, 설계기준강도 24 N/mm²의 콘크리트를 사용하였다.

본 연구에서는 신형상 아연도강판 영구거푸집을 활용하여 Table 1과 같이 10개의 보 실험체를 제작하였으며, 1차, 2차 실험으로 진행하였다. 실험체명의 의미는 Fig. 2와 같다. 1차 실험체는 1.0T, 1.0TL Series의 실험체로 리브의 하단에 절곡을 용이하게 하기 위한 노치부가 존재하며, 리브와 하부 앵글을 Tack 용접하여 제작하였다.

2차 실험체는 M Series 실험체로 1차 실험체들보다 리브 절곡부의 노치의 크기가 작고, 하부 앵글과 리브와의 용접량을 증가시켜 리브의 제작방법을 변수로 제작한 실험체이다.

Table 1. The Planning of Specimens

Specimens		Rib Thickness (mm)	Shear Connector	Form	Tension Member
1st test	RC	Reinforced concrete beam for comparison			
	1.0T-P-A	1.0	Rib	O	Angle and Rebar
	1.0T-O-A	1.0	Rib	X	Angle and Rebar
	1.0TL-P-Ra	1.0	Lattice	O	Rebar
	1.0TL-O-Ra	1.0	Lattice	X	Rebar
	1.0T-P-Ra	1.0	Rib	O	Rebar
	1.0T-O-Ra	1.0	Rib	X	Rebar
2nd test	M1.0T-P-A	1.0	Rib	O	Angle and Rebar
	M1.0T-O-A	1.0	Rib	X	Angle and Rebar
	M0.8T-P-Ra	0.8	Rib	O	Rebar

Fig. 2. Meaning of the Name of Specimens

Fig. 3은 실험체의 단면형상이다. Ra형 실험체는 리브하단의 단절부를 L-25 × 25 × 1.2의 앵글로 용접하였고 하부에 인장철근 HD22를 8대 배근하였다. A형 실험체는 L-50 × 50 × 6의 앵글로 용접하였고 하부에 인장철근 HD22를 6대 배근하였다.

Fig. 3. Sectional Plan of Specimens

Fig. 4는 실험체의 측단면도이며, 부재의 전체경간은 3,600 mm, 리브의 간격은 150 mm이다. 1.0T Series의 실험체는 전단재인 리브가 압축철근과 직접 용접되어 전단연결재를 별도로 사용하지 않았지만, 1.0TL Series의 실험체는 전단재 리브와 압축철근 사이에 7 mm lattice를 전단연결재로 사용하였다. RC 실험체는 전단철근으로 HD10을 사용하였으며, Ra형 실험체와 철근 배근이 동일하다. 전단철근의 간격은 모든 실험체의 리브 간격과 동일하게 150 mm이다.

Fig. 4. Side Cross-section of Specimens

2.2 실험 계획

실험은 Fig. 5와 같이 2점 가력 실험으로 실시하였으며, 최대용량이 2,000 kN인 만능시험기(UTM)를 사용하였다. 지점거리가 3,200 mm가 되도록 지점을 설치하였으며, 실험체를 양쪽 지점에 200 mm가 걸쳐지도록 설치하였다.

또한, 가력점 사이의 간격은 지점과 가력점사이의 간격을 2.5d 이상 확보하기 위하여 400 mm로 두었으며, 가력속도는 변위제어로 항복 전 분당 1.5 mm, 항복 후 분당 3 mm로 가력하였다. 실험체의 변위를 측정하기 위하여 보의 중앙부에 2개의 변위계를 설치하였으며, 두 변위계의 평균을 산정하여 중앙부의 변위를 산정하였다.

Fig. 5. Installation of Specimens

하중별 파괴모드를 확인하기 위하여 실험을 진행하는 동안 거푸집 박리 및 균열을 확인하였다. 영구 거푸집을 그대로 유지시킨 실험체는 음파탐지를 통하여 거푸집이 콘크리트에서 박리되어 강판이 불록해지는 하중을 체크하면서 실험을 진행하였다. 또한, 거푸집이 제거된 실험체에 대해서는 균열발생시 균열과 하중을 체크해가며 실험을 진행하였다.

Fig. 6은 실험체에 부착한 스트레인 게이지의 위치이다. Fig. 6(a)와 같이 콘크리트 슬래브 상부 정중앙에 스트레인 게이지(Gage 5)를 1개 부착하였으며, 보의 압축철근(Gage 1)과 인장철근(Gage 2)에도 Figs. 6(b), 6(c), 6(d)와 같이 각각 1개씩의 스트레인 게이지를 부착하였다.

Fig. 6. Gage Location of Specimens

또한, 1.0T, 1.0TL Series의 실험체는 사인장균열 내에 게이지가 위치하도록 Fig. 6(b)와 같이 보의 양 끝단으로부터 600 mm, 지점으로부터 400 mm 떨어진 리브의 중앙(Gage 3, 4)에 스트레인 게이지를 부착하였다.

1.0T-P-Ra, 1.0T-O-Ra 실험체는 Fig. 6(c)와 같이 Gage 4를 부착한 ②번 방향에 추가적으로 리브의 상·하부(Gage 6, 7)에 한 개씩의 스트레인 게이지를 부착하였다.

M Series의 실험체는 Fig. 6(d)와 같이 보의 양 끝단으로부터 900 mm, 지점으로부터 700 mm 떨어진 리브의 중앙부(Gage 3, 4)에 스트레인 게이지를 부착하였다. M Series의 실험체는 3개 모두 Gage 4를 부착한 ②번 방향 상·하부(Gage 6, 7)에 추가적으로 한 개씩의 스트레인 게이지를 부착하였다.

2.3 소재 시험

실험체에 사용된 강재 및 콘크리트의 소재특성을 파악하기 위하여 소재시험을 실시하였다. 강재의 인장시험편은 KS B 0801 (2017) 「금속재료 인장시험편」에 따라 제작하였으며, 콘크리트 공시체는 KS F 2403 (2019) 「콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법」에 따라 제작하였다.

Fig 7은 각각 실험체 타설 시 사용한 콘크리트의 배합표이며, Table 2는 타설 시 채취한 콘크리트 공시체의 압축시험 결과이다.

Nomenclature		Classification by type of concrete type of concrete		Classification according to maximum dimensions of coarse aggregate (mm)						Nominal strength (MPa)		Slump or slump flow (mm)		Classification by cement type			
		Ordinary concrete		25						24		180		Normal portland cement Type I			
Specification mixing table (kg/m ³)																	
Cement	Cement	Water	Regel- ing Water	Fine aggregate	Fine aggregate	Fine aggregate	Coarse aggregate	Coarse aggregate	Coarse aggregate	Admixt	Admixt	Admixt	Admixt	Admixt	Admixt		
①	②			①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③		
358		170		848			956						2.49				
Water recombination ratio				47.8 %						Fine aggregate percentage						47.5 %	

(a) RC, 1.0T-P-Ra, 1.0T-O-Ra

Nomenclature		Classification by type of concrete type of concrete		Classification according to maximum dimensions of coarse aggregate (mm)						Nominal strength (MPa)		Slump or slump flow (mm)		Classification by cement type	
		Ordinary concrete		25						24		150		Normal portland cement Type I	
Specification mixing table (kg/m ³)															
Cement	Cement	Water	Recog- ing Water	Fine aggregate	Fine aggregate	Fine aggregate	Coarse aggregate	Coarse aggregate	Coarse aggregate	Admix- ure	Admix- ure	Admix- ure	Admix- ure	Admix- ure	Admix- ure
①	②			①	②	③	④	⑤	⑥	①	②	③	④	⑤	⑥
362		163		854				962					1.81		
Water recombination ratio				45.0 %				Fine aggregate percentage				47.5 %			

(b) 1.0TL-P-Ra, 1.0TL-O-Ra, 1.0T-P-A, 1.0T-O-A

Nomenclature		Classification by type of concrete type of concrete			Classification according to maximum dimensions of coarse aggregate (mm)						Nominal strength (MPa)		Slump or slump flow (mm)		Classification by cement type			
		Ordinary concrete			25						24		120		Normal portland cement Type I			
Specification mixing table (kg/m ³)																		
Cement	Cement	Water	Recog- ing Water	Fine aggregate	Fine aggregate	Fine aggregate	Coarse aggregate	Coarse aggregate	Coarse aggregate	Admix- ure	Admix- ure	Admix- ure	Admix- ure	Admix- ure	Admix- ure	Admix- ure		
①	②			①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③			
218		172		976			808			84	33		2.68					
Water recombination ratio				51.4 %						Fine aggregate percentage						55.2 %		

(c) M1.0-P-A, M1.0-O-A, M0.8-P-Ra

Fig. 7. Concrete Mixing Table

Table 2. Material Test Result of Concrete

Specimens		Compressive strength	Concrete age
1st test	RC, 1.0T-P-Ra, 1.0T-O-Ra	24.2 N/mm ²	More than 4 weeks
	1.0TL-P-Ra, 1.0TL-O-Ra, 1.0T-P-A, 1.0T-O-A	24.0 N/mm ²	
2nd test	M1.0-P-A, M1.0-O-A, M0.8-P-Ra	24.2 N/mm ²	

Table 3은 아연도강판, L형강 및 철근(HD10, HD22)의 강재 인장시험 결과이다.

Table 4는 한국산업표준(KS)에서 제시하는 강재의 관리 기준(KS D 3503, 2018; KS D 3506, 2018; KS D 3504, 2019)을 나타내었다.

Table 3. Material Test Result of Steel

Specimens		Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elastic modulus (N/mm ²)
1st test	SGC560Y (0.5 mm)	-	788.4	229,464
	SGCD1 (1 mm)	376.2	426.0	189,747
	SGCC (1.2 mm)	262.7	351.9	182,389
	SS275 (6 mm)	314.8	459.8	196,437
	SD400 (HD10)	499.7	631.9	208,824
2nd test	SD400 (HD22)	532.4	669.0	218,827
	SGC560Y (0.5 mm)	-	783.9	220,302
	SGCC (0.8 mm)	398.8	438.9	200,963
	SGCC (1.2 mm)	278.3	365.4	191,901
	SGCD1 (1 mm)	287.2	373.6	208,037
test	SS275 (6 mm)	281.6	414.6	200,811
	SD400 (HD10)	491.5	611.5	216,578
	SD400 (HD22)	519.8	674.5	224,249

Table 4. Standards for Steel Materials Presented by the KS

Steel materials	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation percentage
SGC560Y	570 and above	570 and above	-
SGCC	-	-	-
SGCD1	-	270 and above	37 and above
SS275	275 and above	410~550	18 and above
SD400	400~520	yield-strength 1.15 times or more	16 and above

SGC560Y (0.5 mm) 강판의 인장강도는 한국산업표준 KS D 3506 「용융 아연 도금 강판 및 강대」에서 제시하는 인장강도의 관리기준을 만족하지만, 0.2% off set 방법으로 항복강도를 측정할 수 없다. 또한 SGCC 강재의 경우 한국산업표준(KS D 3506)에서 별도로 항복강도, 인장강도, 연신율의 관리기준을 제시하지 않는다. 1차 실험체의 SGCD1 (1 mm) 강판의 경우 연신율의 관리기준에 충분하지 않았다. 또한, 1차 실험체의 SD400 (HD22) 철근은 항복강도가 관리기준의 항복강도를 약간 초과하였다.

그 외의 모든 강재는 한국산업표준(KS)에서 제시하는 관리기준을 모두 만족했다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 실험체의 예상하중

실험결과와의 비교·분석을 위하여 가력상황에서 T형보의 공칭전단강도와 공칭휨모멘트를 통해 예상하중을 산정하였다.

리브는 Fig. 8의 전개도와 같은 판을 절곡하여 ㄷ자형으로 제작되었다. 또한, Fig. 8과 같이 절곡을 위한 노치부가 발생하여 리브가 하중을 받을 수 있는 단면적은 1.0T, 1.0TL Series 실험체의 경우에는 8 mm (폭) × 1 mm (두께)가 된다.

M1.0T 실험체의 경우 리브가 하중을 받을 수 있는 단면적은 25 mm (폭) × 1.0 mm (두께)가 되며, M0.8T 실험체는 25 mm (폭) × 0.8 mm (두께)가 된다.

Fig. 8. Drawing of the Rib

하지만, 리브의 단절된 부분은 앵글과 용접되어 있어 리브가 연결된 것으로 볼 수 있다. 따라서, 공칭전단강도의 계산시 리브의 단면적을 Fig. 9의 단면도에서 피복두께 40 mm를 제외한 빗금친 부분(Section A라 칭함)의 단면적으로 가정하였다.

따라서 1.0T, 1.0TL, M1.0T Series의 리브의 단면적은 60 mm²라고 가정한 뒤 공칭전단강도를 계산하였고, M0.8T 실험체는 리브의 단면적을 56 mm²로 가정한 뒤 계산하였다.

또한, 0.5 mm의 박판의 영구거푸집은 구조체로서 작용을 하지 않는다고 가정하므로 공칭강도 계산에 반영하지 않았

다. 공칭전단강도는 Eq. (1)과 같이 기존의 철근콘크리트보의 공칭전단강도 계산식을 사용하였다(AIK, 2016).

Fig. 9. Sectional Plan of the Rib - Section A

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

여기서, V_c 는 콘크리트가 부담하는 공칭전단강도이며 V_s 는 전단철근(Rib)가 부담하는 공칭전단강도이다. 각각 Eqs. (2), (3)의 식으로 산정하였다($\lambda = 1.0$ 사용).

$$V_c = \frac{1}{6} \lambda \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

$$V_s = \frac{A_v \times f_y}{s} d \quad (3)$$

A_v : 전단철근(Rib)의 단면적

b_w : 보의 폭

d : 보의 유효깊이

f_{ck} : 콘크리트의 설계기준압축강도

f_y : 전단철근(Rib)의 설계기준항복강도

s : 전단철근(Rib)의 간격

λ : 콘크리트 계수

$\lambda = 1.0$ 보통중량 콘크리트

$\lambda = 0.85$ 모래경량 콘크리트

$\lambda = 0.75$ 경량 콘크리트

또한, 공칭휨모멘트는 Eq. (4)와 같이 기존의 철근콘크리트 보철근보의 공칭휨모멘트 계산식을 사용하였다(Jang and Hong, 2013).

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = \left[C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \right] \quad (4)$$

여기서, M_{n1} 은 인장철근에 의한 단근보의 공칭모멘트이고 M_{n2} 는 압축철근에 의한 우력모멘트이다. C_c 와 C_s 는 각각 Eqs. (5), (6)의 식으로 산정한다.

$$C_c = 0.85 \times f_{ck} \times (c \times \beta_1) \times b = (A_s - A'_s) \times f_y \quad (5)$$

$$C_s = A'_s \times f_s \quad (6)$$

A_s : 인장철근의 단면적
 A'_s : 압축철근의 단면적
 b : T형보의 슬래브 폭
 c : 압축연단에서 중립축까지의 거리
 f_s : 인장철근의 응력
 β_1 : 콘크리트 강도에 따른 중립축 위치에 관련된 계수

Table 5. Expected Load by Nominal Strength

Specimens		Expected load by shear strength (kN)	Expected load by bending strength (kN)
1st test	RC	841.0	1,141.1
	1.0T-P-A	659.0	1,103.4
	1.0T-O-A	659.0	1,103.4
	1.0TL-P-Ra	659.0	1,140.7
	1.0TL-O-Ra	659.0	1,140.7
	1.0T-P-Ra	660.4	1,141.1
	1.0T-O-Ra	660.4	1,141.1
2nd test	M1.0T-P-A	585.6	1,060.0
	M1.0T-O-A	585.6	1,060.0
	M0.8T-P-Ra	657.0	1,115.7

실험체별 예상하중은 Table 5와 같다. 따라서 모든 실험체는 전단파괴가 일어날 것으로 판단된다.

3.2 1차 실험체의 실험결과 및 파괴양상

Fig. 10은 1차 실험체의 실험결과를 하중-변위 그래프로 나타낸 것이며, Table 6에 1차 실험결과를 구간별로 나타내었다.

Table 6. Load and Deflection of 1st Test

Specimens	Diagonal Tension Crack		Yield Load		Maximum Load	
	Load (kN)	Deflection (mm)	Load (kN)	Deflection (mm)	Load (kN)	Deflection (mm)
RC	524.3	6.01	796.7	11.06	929.0	26.63
1.0T-P-A	609.6	5.66	731.1	7.71	874.2	19.62
1.0T-O-A	500.8	4.15	691.9	7.01	813.4	15.72
1.0TL-P-Ra	590.9	5.66	729.1	8.21	884.9	17.67
1.0TL-O-Ra	470.4	4.20	625.2	6.91	733.0	12.11
1.0T-P-Ra	588.0	6.16	696.8	8.56	873.2	23.98
1.0T-O-Ra	408.7	3.85	574.3	6.81	647.8	17.77

Fig. 10. Load-Deflection Curve of 1st Test

실험결과는 단계별 하중과 변위로 나타내었으며, 사인장 균열시, 보의 항복시, 최대하중 도달시로 구분하였다. 실험체의 사인장 균열발생 시점을 결정하는데 있어서 전단재가 있는 경우 사인장 균열 발생시점이 명확하지 않기 때문에 저자마다 정의가 상이하다.

Elstner et al. (1955)는 하중-전단철근변형률곡선이 처음으로 꺾이게 될 때로 정의하였다. 그리고 Rodriguez et al. (1959)는 사인장균열이 지점이나 가력점에 닿을 때로 정의하였다.

본 연구에서는 실험체의 전단철근(Rib)의 변형률이 급변 시점이 뚜렷하므로 Mphonde and Frantz (1985)의 정의를 바탕으로 사인장 균열이 보 깊이의 중앙부를 통과할 때나 전단철근 변형률이 갑자기 증가할 때를 사인장 균열발생 시점으로 정의하였다.

Table 6에서 1차 실험체의 거꾸집을 제거하지 않은 실험체(P형) 사이에는 최대하중의 차이가 크지 않아 내부 변수의 영향보다 거꾸집의 존재 여부가 실험체 내력에 영향을 미치는 주요 변수로 판단된다.

Table 7은 1차 실험체의 최대하중(P_u), 소재시험결과를 적용한 예상하중(P_{An})을 정리한 것이다. 예상하중(P_{An})은 Table 5에서 산정한 공칭전단강도에 의한 예상하중이다.

Table 7. 1st Test Results and Expectation by Section A of Rib

Specimens	Test result (P_u)		Expectation (P_{An})		P_u/P_{An}
	Load (kN)	Failure mode	Load (kN)	Failure mode	
RC	929.0	Shear Failure	841.0	Shear Failure	1.10
1.0T-P-A	874.2		659.0		1.33
1.0T-O-A	813.4		659.0		1.23
1.0TL-P-Ra	884.9		659.0		1.34
1.0TL-O-Ra	733.0		659.0		1.11
1.0T-P-Ra	873.2		660.4		1.32
1.0T-O-Ra	647.8		660.4		0.98

소재시험결과를 적용한 예상하중에 대한 최대하중의 비 (P_u/P_{An})는 0.98~1.34이며, 평균 1.20으로 나타났다. 또한 거푸집제거 실험체와 거푸집존치 실험체 사이에는 약 21%의 강도차이가 발생하였다.

실험체의 파괴양상 및 균열양상을 확인하기 위하여 거푸집존치 실험체의 경우에는 실험 종료 후 거푸집을 제거하였다. 1차 실험체의 거푸집존치 실험체와 거푸집제거 실험체 모두 휨 균열이 거의 발생하지 않았으나, 명확한 사인장 균열을 보이며 파괴되었다. 또한 모든 1.0T, 1.0TL Series 실험체는 Fig. 11과 같이 사인장균열 구간의 4-5개의 리브가 하부 노치부분에서 파괴가 발생하였다.

(a) Form removal specimen (1.0T-O-Ra)

(b) Form maintenance specimen (1.0T-P-Ra)

Fig. 11. Crack of 1.0T, 1.0TL Series

리브의 단절부는 철근 및 앵글이 Tack용접되어 있는데, 이 용접은 가설 용접으로서 리브의 전체 폭에 대해 용접된 것이 아니기 때문에 용접으로 인하여 리브의 단면적에 전단력이 모두 전달되기 어려웠을 것으로 판단된다.

따라서 리브의 항복보다 Tack 용접부에서의 파괴가 일어났으며, 리브 하부 노치부분이 함께 파괴된 것으로 판단된다. 리브단절부의 철근 및 앵글의 용접이 Tack용접이 아니라 리브의 전체 폭에 대해 용접이 된다면, RC보 이상의 구조성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.1 1.0T-P-A, 1.0T-O-A 실험체

Fig. 12는 1.0T-P-A, 1.0T-O-A 실험체의 하중-변형률 그래프이며, 변형률은 10^6 을 곱해준 값을 x축으로 사용하였다.

Fig. 12. Load-Strain Curve of Rib (1.0T-P-A, 1.0T-O-A)

1.0T-P-A, 1.0T-O-A 두 실험체는 동일하게 Gage 3에서 더 큰 변형률을 보였으며, Gage 4의 거동과 변형률은 비슷하다. 이는 두 실험체 모두 ①번 방향에서 파괴가 발생하였으며, 파괴가 발생한 ①번 방향의 Gage 3에서 항복변형률 $\epsilon_y = 1.983 \times 10^{-6}$ 에 못 미치는 것으로 보아 전단재의 중앙부는 항복강도에 도달하기 전에 리브 하부의 파단으로 인하여 파괴된 것으로 판단된다.

3.2.2 1.0TL-P-Ra, 1.0TL-O-Ra 실험체

Fig. 13은 1.0TL-P-Ra, 1.0TL-O-Ra 실험체의 하중-변형률 그래프이며, 변형률은 10^6 을 곱해준 값을 x축으로 사용하였다.

Fig. 13. Load-Strain Curve of Rib (1.0TL-P-Ra, 1.0TL-O-Ra)

1.0TL-P-Ra, 1.0TL-O-Ra 실험체는 리브의 단절부에 L-25 × 25 × 1.2의 앵글이 용접되어 있다. 이로 인해 내부의 리브가 전단재로서의 역할을 하지만 앞의 L-50 × 50 × 6 앵글을 사용한 A형의 실험체에 비하여 용접되는 모재의 두께가 얇으므로 용접부강도가 낮아 1.0T-O-A 실험체에 비하여 1.0TL-O-Ra 실험체의 최대하중이 비교적 낮게 나타난 것으로 판단된다.

1.0T-P-A, 1.0T-O-A 실험체와 마찬가지로 모든 게이지에서 항복변형률 $\epsilon_y = 1.983 \times 10^{-6}$ 에 못 미치는 것으로 보아 전단재의 중앙부에서 항복강도에 도달하기 전에 리브 하부의 파단으로 인하여 파괴된 것으로 판단된다.

3.2.3 1.0T-P-Ra, 1.0T-O-Ra 실험체

Fig. 14는 1.0T-P-Ra, 1.0T-O-Ra 실험체의 하중-변형률 그래프이며, 변형률은 10^6 을 곱해준 값을 x축으로 사용하였다.

1.0T-P-Ra, 1.0T-O-Ra 두 실험체는 리브의 하부에 부착한 Gage 6에서 다른 게이지에 비하여 월등히 높은 변형률을 보이며 항복변형률 $\epsilon_y = 1.983 \times 10^{-6}$ 을 초과하였다. 이는 리

브 하부의 노치부와 L형강과 리브 용접부에 응력이 집중되어 파단 되었기 때문에 판단된다.

1.0T, 1.0TL 실험체들은 Gage 3, 4의 변형률이 항복변형률에 도달하지 못하고 리브 하단부가 파단된 파괴양상을 보였다. 또한 리브하단의 Gage 6만 변형률이 눈에 띄게 상승하였다. 이러한 점을 근거로 생산성 향상을 위한 리브 절곡부의 노치부와 Tack 용접이 1.0T, 1.0TL 실험체의 최대하중이 RC보 보다 낮게 나타난 강도저하의 원인이 된 것으로 보여진다.

3.3 2차 실험체의 실험결과 및 파괴양상

Fig. 15는 2차 실험체의 실험결과를 하중-변위 그래프로 나타낸 것이며, Table 8에 2차 실험결과를 구간별로 나타내었다.

Fig. 15. Load-Deflection Curve of 2nd Test

Table 9에서 2차 실험체의 최대하중의 비(P_u/P_{An})는 1.58~1.89이며, 평균 1.70로 나타났다. 또한 거푸집제거 실험체와 거푸집존치 실험체 사이에는 19%의 강도차이가 발생하였다.

Fig. 14. Load-Strain Curve of Rib (1.0T-P-Ra, 1.0T-O-Ra)

Table 8. Load and Deflection of 2nd Test

Specimens	Diagonal Tension Crack		Yield Load		Maximum Load	
	Load (kN)	Deflection (mm)	Load (kN)	Deflection (mm)	Load (kN)	Deflection (mm)
M1.0T-P-A	608.6	5.60	897.7	11.21	1,104.5	31.49
M1.0T-O-A	476.3	4.56	719.3	9.21	928.1	15.27
M0.8T-P-Ra	602.7	6.00	844.8	10.31	1,064.3	21.58

Table 9. 2nd Test Results and Expectation by Section A of rib

Specimens	Test result (P_u)		Expectation (P_{An})		P_u/P_{An}
	Load (kN)	Failure mode	Load (kN)	Failure mode	
M1.0T-P-A	1,104.5	Shear Failure	585.6	Shear Failure	1.89
M1.0T-O-A	928.1		585.6		1.58
M0.8T-P-Ra	1,064.3		657.0		1.62

1차 실험체와 마찬가지로 2차 실험체 또한 휨균열은 거의 보이지 않았으며, 명확한 사인장균열을 보이며 파괴되었다. 하지만, 1차 실험체들과 달리 2차 실험체 중 거푸집을 제거한 M1.0T-O-A 실험체에서 Fig. 16과 같이 사인장균열 하부 부근에서 리브 1~2개만이 재하 하중을 빼는 과정에서 끊어졌다. 또한, 사인장균열 상부 부근에서는 압축철근과 용접하여 정착시킨 리브의 2개가 파단되었다.

(a) Diagonal tension crack upper

(b) Diagonal tension crack lower

Fig. 16. Crack of M1.0T-O-A

또한, 거푸집을 준치시킨 실험체의 파괴양상은 Fig. 17과 같다. M1.0T-P-A 실험체의 경우 사인장균열 구간의 리브 하부에서 파단이 발생하지 않았다. M0.8T-P-Ra 실험체의 경우 사인장균열 하부의 리브 1개가 노치부 파단이 발생하였다. M Series 실험체의 리브 단절부는 철근 및 앵글이 Tack 용접이 아닌 리브 전체폭에 대하여 용접되었기 때문에 리브가 전단력에 저항한 것으로 판단된다.

(a) Crack of M1.0T-P-A

(b) Crack of M0.8T-P-Ra

Fig. 17. Crack of M1.0T-P-A & M0.8T-P-Ra

Fig. 18은 M Series 실험체의 하중-변형률 그래프이며, 변형률은 10^6 을 곱해준 값을 x축으로 사용하였다.

M1.0T-P-A 실험체는 리브의 중앙부 Gage 4와 상단부 Gage 7의 변형률이 항복변형률 $\epsilon_y = 1,381 \times 10^{-6}$ 을 초과하며, Gage 7의 변형률이 더 높게 나타났다. M1.0T-O-A 실험체는 리브의 중앙부 Gage 3, Gage 4와 하단부 Gage 6의 변형률이 항복변형률 $\epsilon_y = 1,381 \times 10^{-6}$ 을 초과하였으며, M0.8T-P-Ra 실험체는 리브의 중앙부 Gage 3, Gage 4와 상단부 Gage 7이 항복변형률 $\epsilon_y = 1,984 \times 10^{-6}$ 을 초과하였다.

따라서, M Series 실험체는 리브 단절부의 용접량을 증가시키고 노치부의 단면적을 증가시킨 결과 1.0T, 1.0TL 실험체에 비해 리브가 하단에서 파괴되지 않고 리브가 전단력에 고르게 저항한 것으로 판단된다.

(a) M1.0T-P-A

(b) M1.0T-O-A

(c) M0.8T-P-Ra

Fig. 18. Load-Strain Curve of Rib (M Series)

3.4 용접량 증가에 따른 리브의 참여율

Table 9와 같이 M1.0T-P-A, M1.0T-O-A 실험체는 1.0T-P-A, 1.0T-O-A 실험체에 비해 공칭전단강도에 의한 예상하중은

11% 낮았으나, 실험결과는 M1.0T-P-A가 26%, M1.0T-O-A가 14% 높게 나타났다. 또한, M0.8T-P-Ra 실험체는 1.0T-P-Ra 실험체와 공칭전단강도에 의한 예상하중이 거의 비슷하나, 실험결과는 22% 높게 나타났다.

또한, M Series 실험체는 노치부 단면적 증가와 용접량이 증가되면서 실험결과와 예상하중의 차이가 발생하였다. 이는 전단력에 저항하는 리브의 단면적을 Fig. 9와 같이 피복두께를 제외하고 60 mm² 및 56 mm²라고 가정하였지만(Section A), 리브 단절부의 용접량 증가로 인해 리브의 전단 저항 참여율이 증가한 것으로 판단된다.

M Series 실험체의 공칭전단강도에 의한 예상하중을 재산정하기 위하여 리브의 단면적을 Fig. 19의 단면도에서 피복두께부분을 포함한 빗금친 부분(Section B라 칭함)의 단면적으로 가정하였다.

Fig. 19. Sectional Plan of the Rib - Section B

Table 10은 Fig. 19와 같이 리브의 피복두께부분을 단면적에 포함시킬시 예상하중(P_{Bn})과 실험체의 최대하중(P_u)을 나타낸 것이다. 소재시험결과를 적용한 예상하중에 대한 최대하중의 비(P_u/P_{Bn})는 1.18~1.40이며, 평균 1.26으로 나타났다.

따라서 리브 단절부의 용접품질과 노치부의 정도가 실험체의 강도에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서 신형상 아연도강판 영구거꾸집의 생산 시 자동용접을 통한 품질관리가 철저하게 이루어진다면 리브가 철근 스티럽을 대신할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 10. Test results and Expectation by section B of Rib

Specimens	Test Result (P_u)		Expectation (P_{Bn})		P_u/P_{Bn}
	Load (kN)	Failure Mode	Load (kN)	Failure Mode	
M1.0T-P-A	1,104.5	Shear Failure	786.9	Shear Failure	1.40
M1.0T-O-A	928.1				1.18
M0.8T-P-Ra	1,064.3				1.21

3.5 1, 2차 실험 결과 비교

Fig. 20은 1, 2차 실험체의 실험결과를 하중-변위 그래프로 나타낸 것이며, Table 11에서 1, 2차 실험체 최대하중과 최대 변위를 나타내었다.

Fig. 20. Load-Deflection Curve of Specimens

Table 11. Load and Deflection of 1st & 2nd Test Specimens

Specimens		Maximum Load	
		Load (kN)	Deflection (mm)
1st test	RC	929.0	26.63
	1.0T-P-A	874.2	19.62
	1.0T-O-A	813.4	15.72
	1.0TL-P-Ra	884.9	17.67
	1.0TL-O-Ra	733.0	12.11
	1.0T-P-Ra	873.2	23.98
	1.0T-O-Ra	647.8	17.77
2nd test	M1.0T-P-A	1104.5	31.49
	M1.0T-O-A	928.1	15.27
	M0.8T-P-Ra	1064.3	21.58

1차 실험의 P형 실험체는 최대하중이 평균 877.4 kN으로 RC실험체의 94.4%이며, 2차 실험의 P형 실험체는 최대하중이 평균 1,084.4 kN으로 RC실험체의 116.7%이다.

따라서, 강판을 절곡한 리브가 전단철근을 대신한 부분에서는 단면의 효율성이 철근을 사용 것과 비교 우위에 있으나, 리브의 노치 및 하부 단절부 용접의 건전성이 중요하다고 보여진다.

4. 결 론

신형상 아연도강판 영구거푸집을 사용한 철근콘크리트 보의 전단연결재, 인장재, 거푸집의 유무, 리브의 형상 및 용접량 차이에 따른 전단성능을 평가하기 위하여 1차 실험

및 2차 실험을 실시하였다.

- (1) 1차 실험의 결과, 소재시험결과를 적용한 예상하중에 대한 최대하중의 비는 0.98~1.34이며, 평균 1.20으로 나타났다.
- (2) 1차 실험체의 파괴양상은 모두 명확한 사인장 균열을 보였으며, 사인장 균열 구간의 4-5개의 리브가 하부 노치 부분에서 파괴되었다. 또한, 1.0T-P-Ra와 1.0T-O-Ra 실험체의 리브 중앙부와 상부의 변형률은 항복변형률에 못 미쳤으나, 하부의 변형률은 항복변형률을 초과하였다. 이러한 파괴양상 및 변형률을 근거로 실험체의 파괴가 하부 리브의 노치부 및 앵글의 용접부에 응력이 집중되어 발생된 것으로 판단된다.
- (3) 2차 실험의 M Series 실험체는 리브의 노치를 줄이고, 리브 단절부의 용접을 리브의 폭만큼 실시하여 용접부의 품질을 개선한 실험체이다. 리브의 피복두께부분을 단면적에 포함시킬시 소재시험결과를 적용한 예상하중에 대한 최대하중의 비는 1.18~1.40이며, 평균 1.26으로 나타났다. 2차 실험의 P형 실험체는 최대하중이 평균 1084.4 kN으로 RC실험체의 116.7%이다.
- (4) 따라서, 본 연구에서 제작한 신형상 아연도강판 영구거푸집은 리브의 노치부와 리브 단절부의 용접품질이 실험체의 강도에 큰 영향을 미치며, 영구거푸집의 생산 시 수동용접이 아닌 자동용접을 통한 품질관리가 철저하게 이루어진다면 리브가 철근 스티럽을 대신할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Architectural Institute of Korea (AIK). (2016). Korean building code and commentary. Seoul: Kimoondang.
- Chae, D.K. et al. (1997). *A study on the permanent formwork system using a thin precast concrete panel*. Report ID R&D / 95-0068. Ministry of Construction & Transportation.
- Elstner, R.C., Moody, K.G., Viest, I.M., and Hognestad, E. (1955). Shear strength of reinforced concrete beams. Part 3-Tests of restrained beams with web reinforcement. *ACI Journal Proceeding*, Vol. 51, No. 2, pp. 525-539.
- Jang, D.C., and Hong, G.P. (2013). *Explanation of architecture reinforced concrete*. Seoul: Kimoondang.
- Kim, H.N., Kim, W.J., Kim, S.S., and Jung, S.J. (1999). An experimental study on the mock-up efficacy and the

- economic evaluation of the permanent form in the site. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 15, No. 4, pp. 91-98.
- Kim, K.H., Kim, K.H., Lee, Y.S., and Kim, J.J. (2008). A study about influence of risk factors in relation to construction cost increase and schedule delay on the reinforced concrete construction. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 24, No. 5, pp. 165-172.
- Kim, W.J., and Jung, S.J. (2002). The experiment study of for cement mortar permanent form's performance evaluation. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 18, No. 3, pp. 133-140.
- KS B 0801. (2017). *Test pieces for tensile test for metallic materials*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS D 3503. (2018). *Rolled steels for general structure*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS D 3504. (2019). *Steel bars for concrete reinforcement*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS D 3506. (2018). *Hot-dip zinc-coated steel sheets and coils*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 2403. (2019). *Standard test method for making and curing concrete specimens*. Korean Agency for Technology and Standards.
- Mphonde, A.G., and Frantz, G.C. (1985). Shear tests of high- and low-strength concrete beams with stirrups. *ACI SP 87.10 on High-Strength Concrete*, ACI, pp. 179-196.
- Oh, J.Y., Lee, D.H., Yang, H.M., Kim, M.S., and Kim, K.S. (2017). Evaluation of structural performance of prefabricated columns with permanent thin-walled steel form integrated with reinforcing bars at eccentric loads. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 33, No. 5, pp. 47-53.
- Rodriguez, J.J., Bianchini, A.C., Viest, I.M., and Kesler, C.E. (1959). Shear strength of two-span continuous reinforced concrete beams. *ACI Journal Proceeding*, Vol. 55, No. 4, pp. 1089-1130.

Received	May 13, 2020
Revised	May 15, 2020
Accepted	June 3, 2020