

보강판 제원에 따른 개단면 리브 보강판의 국부 처짐과 국부 모멘트의 정형화

주 석 범^{1)*}

¹⁾ 부교수, 세명대학교, 토목공학과

Formulating the Local Displacement and Local Moments of a Plate Stiffened with Open Ribs According to the Dimensions of Stiffened Plates

Chu, Seok Beom^{1)*}

¹⁾ Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon, 390-711, Korea

ABSTRACT : The purpose of this study is to formulate the local displacement and moments of a plate stiffened with open ribs according to the dimensions of stiffened plates. Analyzed results of various plates stiffened with rectangular and reverse T ribs show that the effect of the lower flange to the local behavior is very small, so the local behavior can be expressed by ratio functions of the rib space, web thickness, web height and plate thickness and the ratio functions of rectangular and reverse T ribs can be unioned. The application of ratio functions to other types of stiffened plates shows that the increment of the error ratio is so small compared with examples of this study that the applicability of this study is proved.

KEYWORDS : plate stiffened with open ribs, local displacement, local moment, local behavior, ratio function, dimensions of stiffened plate

1. 개 요

강바닥판 교량은 효율적인 구조로 고정하중을 감소시킬 수 있어 기존 교량의 성능 개량 공사와 장기간 교량에 많이 사용되고 있으나, 진동에 따른 피로와 박판 사용에 따른 좌굴에 취약하다는 단점을 갖게 되어, 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다^{[1],[2],[3],[4]}.

또한 설계 측면에서 강바닥판은 그 거동 해석이 매우 어려워 실무에서는 보강판을 간단하게 직교이방성 판으로 해석하거나, 격자 구조로 모델링하여 해석하는 방법 등이 사용되고

있으나^{[5],[6]}, 이러한 해석 방법은 제원에 따라 정확도가 달라진다는 문제점과 강판 자체로서 하중을 전달시켜주는 국부 거동을 고려할 수 없다는 문제점을 갖게 된다. 그동안 이러한 문제를 해결하기 위하여 여러 연구가 이루어졌으나, 대부분 보강판의 처짐 거동에 국한하여 연구가 진행되어 왔다^{[7],[8],[9]}.

본 연구에서는 이러한 설계 측면에서의 문제점을 해결하기 위하여, 국부 처짐뿐만 아니라 국부 모멘트까지 고려하여 제원에 따른 개단면 리브 보강판의 국부 거동을 분석하고, 이를 정형화함으로써 사용자가 쉽게 개단면 리브 보강판의 국부 거동을 예측할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 해석 예제

본 연구에서는 주석범 등(2011)^[10]과 마찬가지로 Fig. 1과 같이 보강판 길이 방향(1m) 양단이 단순 지지된 경우를 고려하였으며, 평강 또는 역T형 리브로 보강된 여러 가지 제원을 갖는 보강판에 대하여 보강판의 중앙에 위치한 50mm

Note.-Discussion open until June 30, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 12, 2012; revised October 10, 2012; approved on December 11, 2012.
© KSSC 2012

* Corresponding author

Tel. +82-043-649-1334; Fax. +82-043-649-1778
E-mail: chusb@semyung.ac.kr

× 50mm의 정사각형에 400kN 하중을 작용시키고(분포하중 0.16kN/mm²), 12.5mm × 12.5mm 크기의 4절점 판 요소로 모델링 한 뒤, 해석을 수행하고자 한다^{(11),(12)}.

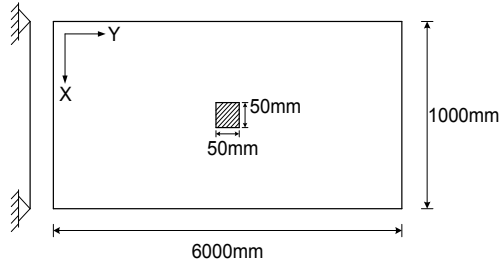
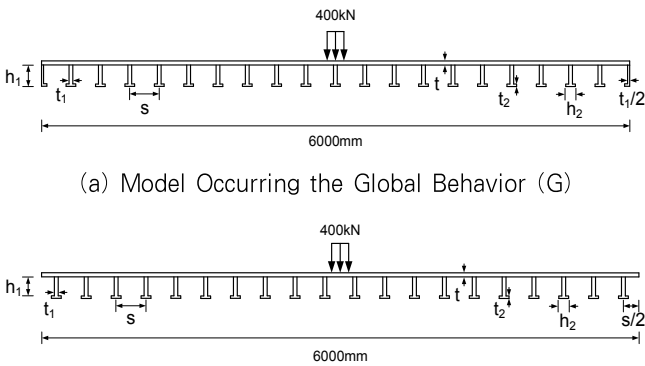


Fig. 1 Stiffened Plate with Open Ribs

개단면 리브 보강판의 국부 거동 분석을 위하여, Fig. 2(a)와 같이 중앙에 위치한 리브 위에 하중을 작용시킨 경우와 Fig. 2(b)와 같이 리브 사이 판의 중앙에 하중을 작용시킨 경우를 고려하였으며, 해석 예제 보강판의 제원은 Table 1과 같다.



(a) Model Occurring the Global Behavior (G)

(b) Model Occurring the Global and Local Behavior (G+L)

Fig. 2 Models to Estimate the Local Behavior

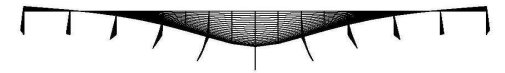
Table 1. Dimensions of Stiffened Plates (mm)

판 두께 t	리브 간격 s	복부 높이 h_1	평강	역T형		
				복부 두께 t_1	복부 두께 t_2	플랜지 길이 h_2
10	300	200	10	9	14	90
12	400	250	15	10	15	100
14	500	300	20	11	16	110

중앙에 위치한 리브 위에 하중을 작용시킨 경우 Fig. 3(a)와 같이 보강판의 전체 거동(G)을 나타내고, 리브 사이 판의 중앙에 하중을 작용시킨 경우 Fig. 3(b)와 같이 전체 거동(G)과 함께 국부 거동(L)이 발생한다고 가정하고, 두 결과의 차이

를 국부 거동(L)으로 정의하면 그 결과는 Fig. 3(c)와 같다.

Fig. 3(c)에서 보듯이 국부 거동은 하중이 재하된 부근에 국한하여 발생함을 알 수 있으며, 본 연구에서는 이중 보강판 중앙점에서의 국부 처짐과 국부 모멘트를 비교·분석하여 이를 정형화 하고자 한다.



(a) Model Occurring the Global Behavior (G)



(b) Model Occurring the Global and Local Behavior (G+L)



(c) Local Behavior ((b)-(a))

Fig. 3 Estimating Method of the Local Behavior

3. 민감도 분석

본 장에서는 보강판의 각 제원 변화가 개단면 리브 보강판의 국부 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, Table 1의 가장 작은 제원을 갖는 보강판을 기준으로 각각의 제원 변화에 따른 국부 처짐과 국부 모멘트의 변화량을 산정한 뒤, Table 2 및 Table 3과 같이 제원 1% 증가에 따른 변화율(%)로 비교하고자 한다.

Table 2 및 3을 살펴보면, 평강 리브와 역T형 리브 모두 유사한 결과를 나타내어, 국부 처짐은 리브 간격, 판 두께, 복부 두께, 복부 높이 순서로 영향을 받으며, 국부 모멘트는 리브 간격, 판 두께, 복부 높이, 복부 두께의 순서로 영향을 받음을 알 수 있으며, 역T형 리브의 플랜지 길이와 두께가 국부 거동에 미치는 영향은 매우 작은 것을 알 수 있다.

Table 2. Variational Ratios(%) According to 1% Increment of each dimension for the Rectangular Rib

각 제원 변화(mm)	국부 처짐	Mxx	Myy	
				리브 간격
	300 → 500	2.871	0.401	0.290
	300 → 600	3.182	0.367	0.257
판 두께	10 → 12	-2.114	-0.155	-0.139
	10 → 14	-1.606	-0.174	-0.157
복부 높이	200 → 250	0.043	0.012	0.023
	200 → 300	0.032	0.009	0.017
복부 두께	10 → 15	-0.109	-0.005	-0.002
	10 → 20	-0.109	-0.010	-0.008

Table 3. Variational Ratios(%) According to 1% Increment of each dimension for the Reverse T Rib

각 제원 변화(mm)	국부 처짐	Mxx	Myy
리브 간격	300 → 400	2.509	0.446
	300 → 500	2.859	0.400
	300 → 600	3.175	0.268
판 두께	10 → 12	-2.076	-0.149
	10 → 14	-1.583	-0.168
복부 높이	200 → 250	0.056	0.017
	200 → 300	0.045	0.014
복부 두께	9 → 10	-0.130	0.002
	9 → 11	-0.129	-0.002
플랜지 길이	90 → 100	-0.007	-0.001
	90 → 110	-0.006	-0.001
플랜지 두께	14 → 15	-0.003	0.001
	14 → 16	-0.003	0.001

이러한 결과로부터 리브 형태와 상관없이 개단면 리브의 국부 처짐과 국부 모멘트는 리브 간격, 판 두께, 복부 높이, 복부 두께에 따라 그 거동이 결정된다고 할 수 있다.

4. 국부 거동의 정형화

보강판의 국부 거동을 정형화하기 위해서는 다른 제원을 갖는 여러 보강판의 거동을 함께 표현할 수 있는 매개변수가 필요하며, 본 연구에서는 식 (1)과 같이 각각의 제원이 보강판 양방향 휨강성에 미치는 효과를 하나로 표현한 강성비(RR : Rigidity Ratio)를 매개변수로 사용하였다^[6].

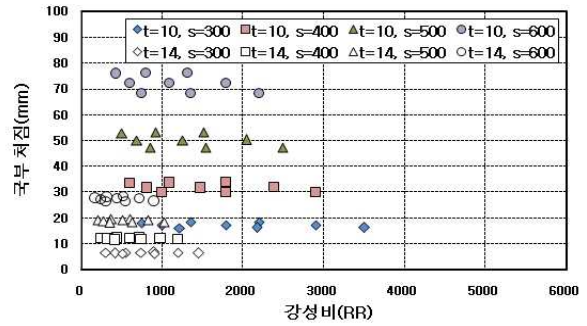
$$RR = D_x / D_y \tag{1}$$

$$= (D_y + \frac{Et e_z^2}{1 - \nu^2} + \frac{EI_n}{s}) / (D_y)$$

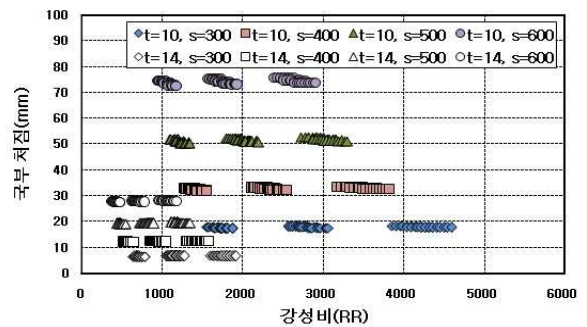
여기서, E 는 탄성 계수, t 는 강판의 두께, ν 는 프야송 비, e_z 는 판 중심부터 보강판 도심까지의 거리, I_n 은 보강판 도심에 대한 보강재의 단면 2차모멘트이며, D_x 는 판과 보강재의 강성, D_y 는 판만의 강성으로 $D_y = Et^3 / 12(1 - \nu^2)$ 이다.

4.1 국부 처짐

Table 1에 나타난 평강 리브 및 역T형 리브 보강판의 국부 처짐중 판 두께 10mm 와 14mm 결과를 리브 간격별로 강성비(RR : Rigidity Ratio)에 따라 나타내면 Fig. 4와 같다.



(a) Rectangular Ribs



(b) Reverse T Ribs

Fig. 4 Analyzed Results of the Local Displacement

Fig. 4를 살펴보면, 일정한 판 두께를 갖는 보강판에서 리브 간격(s)이 증가함에 따라 상대적으로 큰 국부 처짐이 발생하고, 리브 간격 별로 강성비와 상관없이 비슷한 국부 처짐이 발생하여, 리브의 간격이 국부 처짐에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 리브의 간격이 같더라도 판 두께(t)가 두꺼워짐에 따라 국부 처짐이 작아짐을 알 수 있으며, 평강 리브와 역T형 리브 모두 비슷한 양상을 나타냄을 알 수 있다

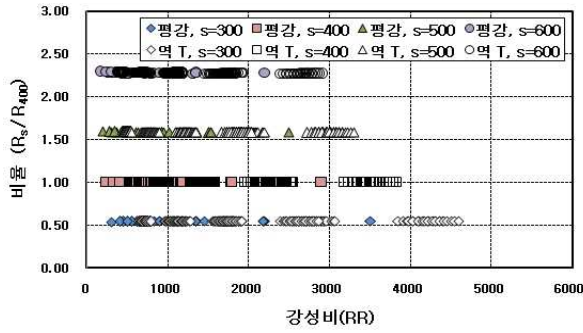
이러한 Fig. 4의 결과를 정형화하기 위하여, Table 1의 각 제원중 역T형 리브의 중간값, 판 두께 12mm, 리브 간격 400mm, 복부 높이 250mm, 복부 두께 10mm와 플랜지 두께 15mm, 플랜지 길이 100mm를 기준 제원으로 사용하고, 민감도 분석에서 그 영향이 작았던 플랜지 두께와 플랜지 길이를 제외하고 다른 제원은 동일한 상태에서 식 (2)~(5)와 같이 각각의 제원 변화에 따른 결과를 각 기준 제원의 결과로 나눈 비율을 구한 뒤, 그 결과를 나타내면 Fig. 5와 같다.

$$\text{리브 간격 비율} = R_s / R_{400} \tag{2}$$

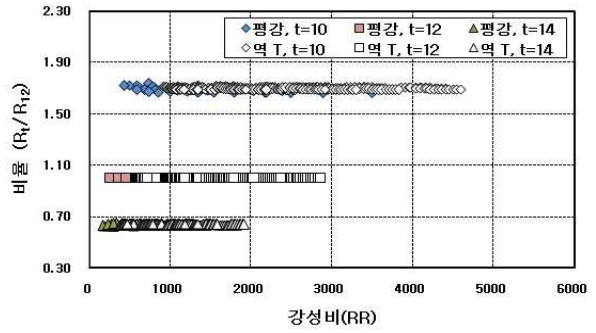
$$\text{판 두께 비율} = R_t / R_{12} \tag{3}$$

$$\text{복부 두께 비율} = R_{t1} / R_{10} \tag{4}$$

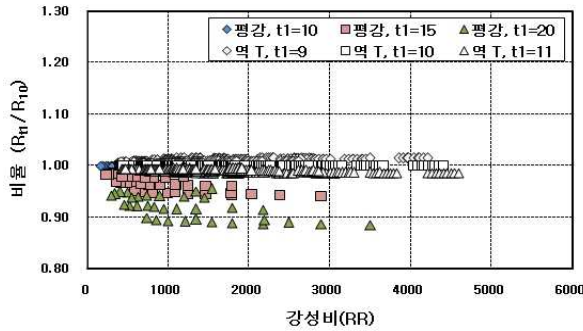
$$\text{복부 높이 비율} = R_{h1} / R_{250} \tag{5}$$



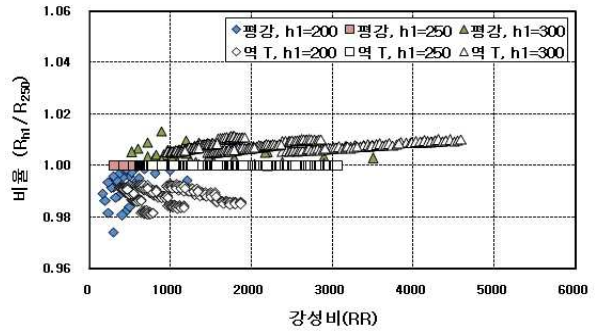
(a) Rib Space (s)



(b) Plate Thickness (t)

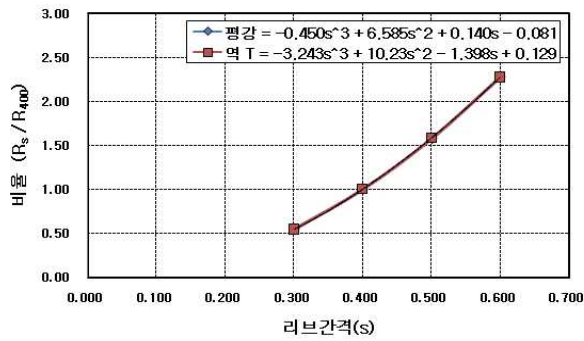


(c) Web Thickness (t1)

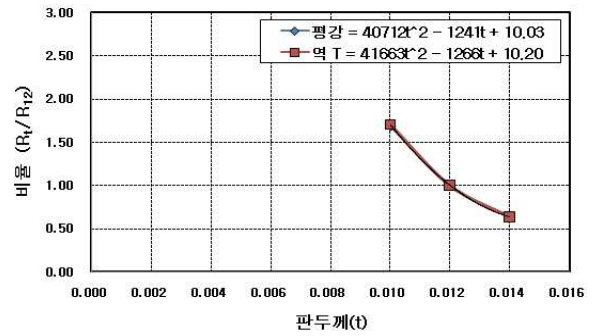


(d) Web Height (h1)

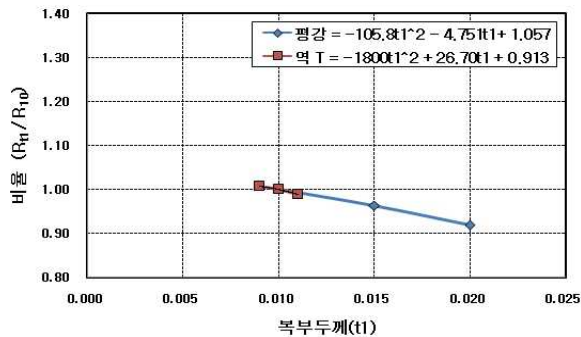
Fig. 5 Ratios of Local Displacements for Each Dimension



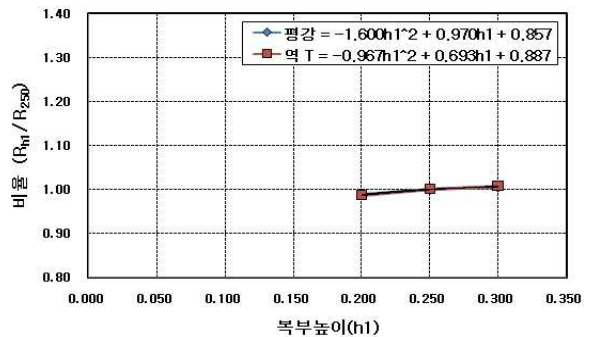
(a) Rib Space (D_1)



(b) Plate Thickness (D_2)



(c) Web Thickness (D_3)



(d) Web Height (D_4)

Fig. 6 Ratio Functions of Local Displacements for Each Dimension

Fig. 5를 살펴보면, 민감도 분석에서 살펴본 바와 같이 리브 간격과 판 두께 변화에 따른 비율 차이가 큰 반면, 복부 두께와 복부 높이 변화에 따른 비율 차이는 크지 않으며, 평강 리브와 역T형 리브의 결과가 서로 비슷함을 알 수 있다.

또한 각 제원별 국부 처짐 비율은 강성비와 상관없이 거의 유사한 값을 나타내므로, 각각의 제원별 비율에 대하여 대푯값을 산정하고, 각 제원 변화가 국부 처짐에 미치는 영향을 비율 함수로 표현하면 Fig. 6과 같다.

각 제원 변화에 대한 비율이 일정하고, 비율 함수를 이용해 제원별 비율 값을 계산할 수 있다는 점을 고려하면, 임의의 제원을 갖는 보강판의 국부 처짐은 식 (6)과 같이 기준 보강판의 국부 처짐(D_0 평강: 19.580mm, 역T: 19.408mm)에 Fig. 6에 나타난 각각의 제원 변화에 따른 비율 함수(D_1, D_2, D_3, D_4)를 곱하여 간편하게 구할 수 있다.

$$D = D_0 (D_1 \times D_2 \times D_3 \times D_4) \quad (6)$$

또한 Fig. 5에 나타난 각 제원별 국부 처짐의 비율과 Fig. 6에 나타난 각 제원별 국부 처짐의 비율 함수는 리브 형태와 상관없이 유사한 양상을 나타냄을 알 수 있으며, 이러한 양상을 고려하여 Fig. 6에 평강 리브와 역T형 리브 각각에 대해 나타난 제원별 비율 함수 중 평강 리브의 비율 함수를 기준으로 통합하여 나타내면 Table 4와 같다.

Table 4. Unioned Ratio Functions for the Local Displacement

제원	$D = D_0 (D_1 \times D_2 \times D_3 \times D_4)$
초기값 (D_0)	평강: 19.580 mm 역T: 19.408 mm
리브간격 (D_1)	$-0.450 s^3 + 6.585 s^2 + 0.140 s - 0.081$
판 두께 (D_2)	$40,712 t^2 - 1,241 t + 10.03$
복부두께 (D_3)	$-105.8 t_1^2 - 4.751 t_1 + 1.057$
복부높이 (D_4)	$-1.600 h_1^2 + 0.970 h_1 + 0.857$

평강 리브와 역 T형 리브 각각의 보강판에 대하여, Fig. 6에 나타난 리브별 비율 함수를 적용하여 계산한 국부 처짐과 Table 4의 통합 함수를 적용하여 계산한 국부 처짐을 실제 산정된 국부 처짐과 비교하여 리브 간격별 오차율로 나타내면 Table 5와 같다.

Table 5중 리브별 함수를 적용한 경우를 살펴보면, 평강 리브의 오차율이 $-2.28\% \sim +2.53\%$ 의 범위로, 역T형 리브는 $-1.66\% \sim +0.37\%$ 의 범위로 나타나 상당한 정확도를 가지며, 리브 간격에 따른 오차율 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

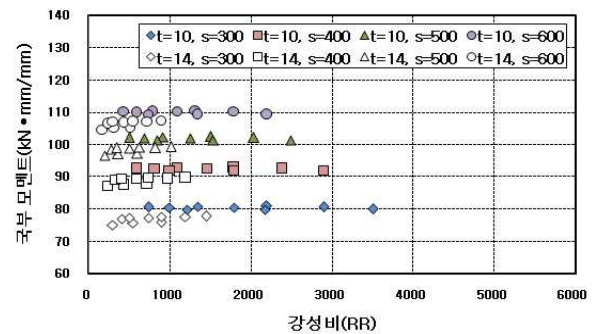
Table 5. Error Ratios(%) Using the Local Displacement Ratio Functions

적용 함수	리브 형태	s=300	s=400	s=500	s=600
리브별 함수	평강 리브	-2.28 ~ 2.53	-2.27 ~ 2.28	-2.10 ~ 2.48	-2.21 ~ 2.42
	역T형 리브	-1.57 ~ 0.34	-1.49 ~ -0.02	-1.66 ~ 0.20	-1.66 ~ 0.37
리브 통합 함수	평강 리브	-2.28 ~ 2.53	-2.27 ~ 2.28	-2.10 ~ 2.48	-2.21 ~ 2.42
	역T형 리브	-1.17 ~ 1.68	-1.32 ~ 0.67	-1.17 ~ 0.80	-1.46 ~ 0.46

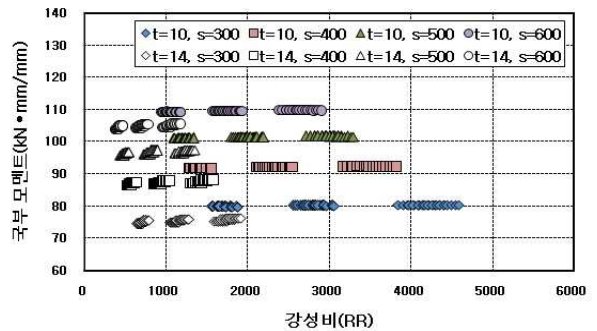
또한 리브 통합 함수를 적용한 경우를 살펴보면, 평강 리브의 경우 자신의 비율함수를 사용하여 오차를 변화가 없으며, 역T형 리브의 경우 통합 후 $-1.46\% \sim +1.68\%$ 의 오차율 범위를 나타내어 함수 통합 후에도 최대 오차를 증가가 크지 않고 상당한 정확도를 나타내므로 사용자의 편리성을 고려하여 본 연구에서는 통합 함수를 기본 함수로 제안하고자 한다.

4.2 국부 모멘트 Mxx

여러 가지 보강판의 국부 모멘트 Mxx 결과를 판 두께와 리브 간격에 따라 나타내면 Fig. 7과 같으며, 국부 모멘트 Mxx는 국부 처짐과 마찬가지로 강성비와 상관없이 판 두께와 리브 간격이 같으면 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

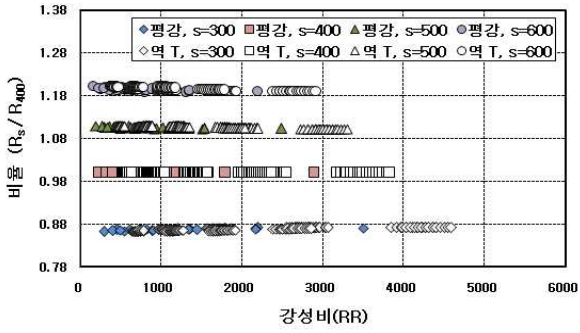


(a) Rectangular Ribs

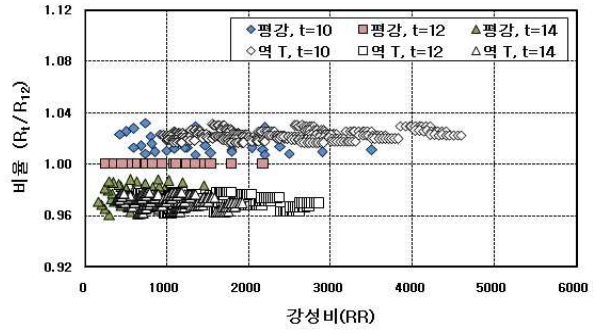


(b) Reverse T Ribs

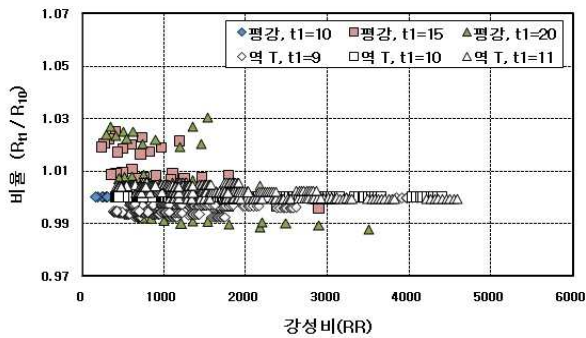
Fig. 7 Analyzed Results of the Local Moment Mxx



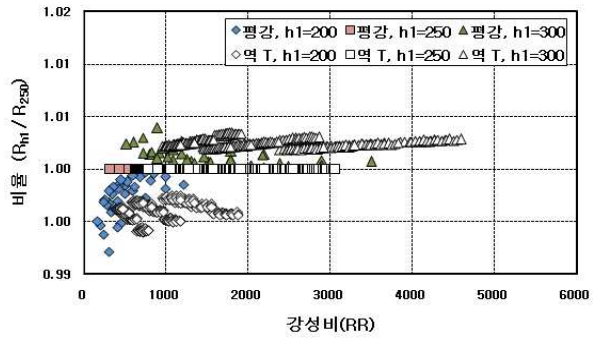
(a) Rib Space (s)



(b) Plate Thickness (t)

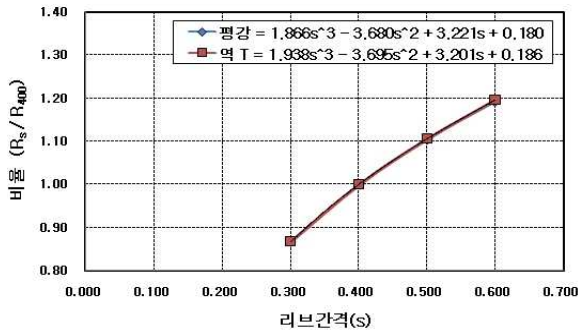


(c) Web Thickness (t1)

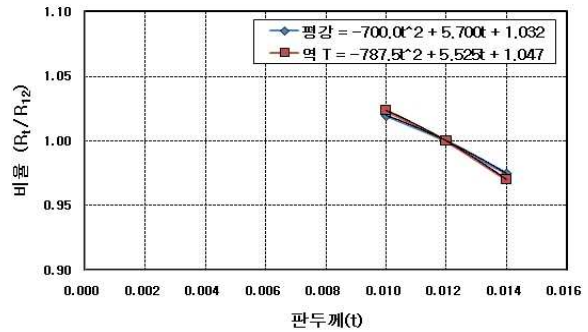


(d) Web Height (h1)

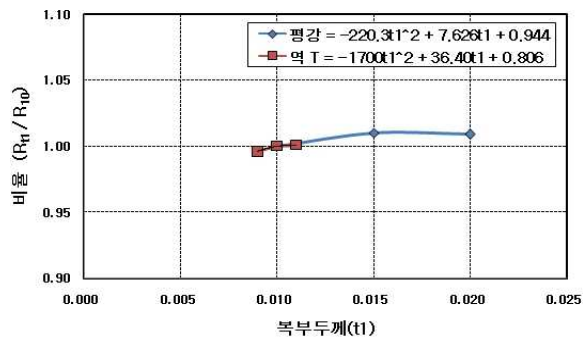
Fig. 8 Ratios of Local Moments Mxx for Each Dimension



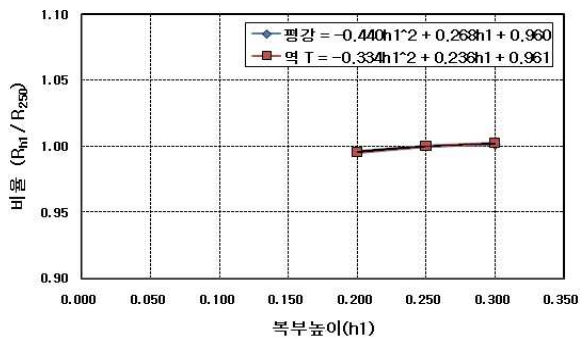
(a) Rib Space (X_1)



(b) Plate Thickness (X_2)



(c) Web Thickness (X_3)



(d) Web Height (X_4)

Fig. 9 Ratio Functions of Local Moments Mxx for Each Dimension

Fig. 7의 결과를 정형화하기 위하여, 국부 처짐과 마찬가지로 판 두께 12mm, 리브 간격 400mm, 복부 높이 250mm, 복부 두께 10mm와 플랜지 두께 15mm, 플랜지 길이 100mm를 기준으로, 다른 제원은 동일한 상태에서 식 (2)~(5)를 이용하여 각각의 제원 변화에 따른 국부 모멘트 M_{xx} 의 비율을 구하여 나타내면 Fig. 8과 같다.

Fig. 8을 살펴보면 각 제원별 비율함수는 강성비와 상관없이 유사한 결과를 나타내므로, 각 제원별로 대푯값을 산정하여 각각의 제원 변화가 국부 모멘트 M_{xx} 에 미치는 영향을 비율 함수로 정형화하여 표현하면 Fig. 9와 같다.

Fig. 8 및 Fig. 9의 결과로부터 국부 처짐과 마찬가지로 임의의 제원을 갖는 보강판의 국부 모멘트 M_{xx} 는 기준 보강판의 국부 모멘트 X_0 (평균: 90.519 kN·mm/mm, 역T: 90.081 kN·mm/mm)에 Fig. 9에 나타난 각각의 제원 변화에 따른 비율 함수 (X_1, X_2, X_3, X_4)를 곱하면 간편하게 구할 수 있으며, 이를 표현하면 식 (7)과 같다.

$$M_{xx} = X_0 (X_1 \times X_2 \times X_3 \times X_4) \quad (7)$$

또한 Fig. 8과 Fig. 9를 살펴보면 두 형태의 리브가 서로 유사한 결과를 나타내므로, 국부 처짐과 마찬가지로 평강 리브 비율 함수를 기준으로 비율 함수를 통합하면 Table 6과 같다.

Table 6. Unioned Ratio Functions for the Local Moment M_{xx}

제원	$M_{xx} = X_0 (X_1 \times X_2 \times X_3 \times X_4)$
초기값 (X_0)	평균 : 90.519 kN·mm/mm 역T : 90.081 kN·mm/mm
리브간격 (X_1)	$1.866s^3 - 3.680s^2 + 3.221s + 0.180$
판 두께 (X_2)	$-700.0t^2 + 5.700t + 1.032$
복부두께 (X_3)	$-220.3t_1^2 + 7.626t_1 + 0.944$
복부높이 (X_4)	$-0.440h_1^2 + 0.268h_1 + 0.960$

Fig. 9에 나타난 평강 리브와 역 T형 리브 각각의 비율 함수를 적용한 경우와 Table 6에 나타난 리브 통합 비율 함수를 적용하여 계산한 국부 모멘트 M_{xx} 를 실제 국부 모멘트 M_{xx} 와 비교하여 리브 간격별 오차율로 나타내면 Table 7과 같다.

Table 7을 살펴보면, 리브 간격에 따른 오차율 차이는 크지 않고, 평강 리브는 통합 전·후 모두 -1.32%~+1.54%의 오차율을 나타내어 상당한 정확도를 보이며, 역 T형 리브는 통합 전 -0.73%~+0.90%, 통합 후 -1.41%~

+ 1.29%의 오차율 범위를 나타내어 통합 후 약간의 오차율 증가가 발생하지만, 함수 통합 후에도 상당한 정확도를 나타냄을 알 수 있다.

Table 7. Error Ratios(%) Using the Local Moment M_{xx} Ratio Functions

적용 함수	리브 형태	s=300	s=400	s=500	s=600
리브별 함수	평강 리브	-1.32 ~ 1.42	-0.92 ~ 1.36	-0.95 ~ 1.53	-1.18 ~ 1.54
	역T형 리브	-0.73 ~ 0.87	-0.41 ~ 0.37	-0.58 ~ 0.68	-0.73 ~ 0.90
리브 통합 함수	평강 리브	-1.32 ~ 1.42	-0.92 ~ 1.36	-0.95 ~ 1.53	-1.18 ~ 1.54
	역T형 리브	-1.41 ~ 1.29	-0.84 ~ 0.80	-0.60 ~ 0.40	-0.62 ~ 0.18

4.3 국부 모멘트 M_{yy}

국부 모멘트 M_{yy} 도 앞서 살펴보았던 국부 처짐 및 국부 모멘트 M_{xx} 와 마찬가지로의 양상을 나타내므로, 각 제원별 국부 모멘트 M_{yy} 비율에 대하여 대푯값을 산정하고 그 양상을 정형화하여 함수식으로 나타내면 Fig. 10과 같이 표현된다.

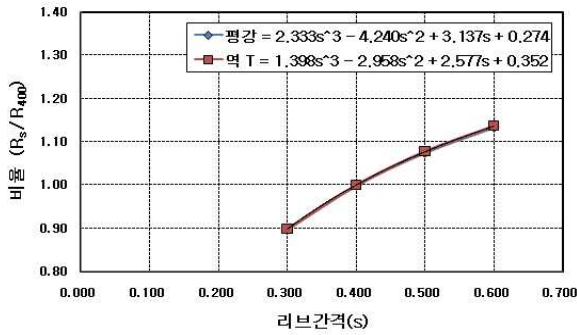
임의 제원을 갖는 보강판의 국부 모멘트 M_{yy} 는 국부 처짐 및 M_{xx} 와 마찬가지로 식 (8)과 같이 기준 보강판의 국부 모멘트 Y_0 (평균: 125.721 kN·mm/mm, 역T: 125.652 kN·mm/mm)에 Fig. 10에 나타난 각각의 제원 변화에 따른 비율 함수 (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4)를 곱하면 간편히 구할 수 있다.

$$M_{yy} = Y_0 (Y_1 \times Y_2 \times Y_3 \times Y_4) \quad (8)$$

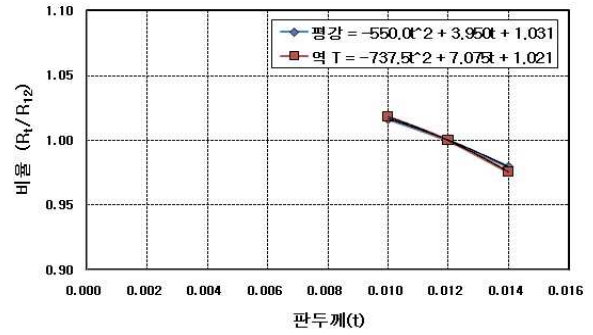
Fig. 10에 나타난 국부 모멘트 M_{yy} 에 대한 각 제원별 비율 함수 역시 평강과 역T형 리브가 거의 같은 양상을 나타내므로, 이를 고려하여 평강 리브 비율 함수를 기준으로 통합한 국부 모멘트 M_{yy} 비율 함수를 나타내면 Table 8과 같다.

Table 8. Unioned Ratio Functions for the Local Moment M_{yy}

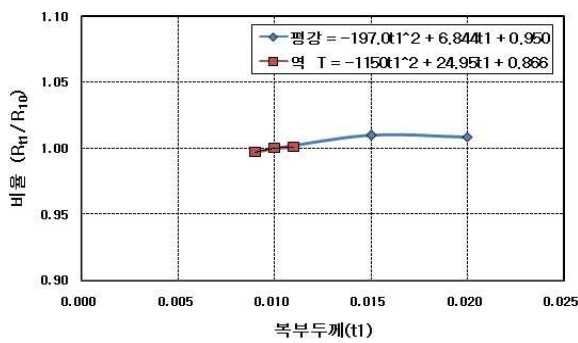
제원	$M_{yy} = Y_0 (Y_1 \times Y_2 \times Y_3 \times Y_4)$
초기값 (Y_0)	평균 : 125.721 kN·mm/mm 역T : 125.652 kN·mm/mm
리브간격 (Y_1)	$2.333s^3 - 4.240s^2 + 3.137s + 0.274$
판 두께 (Y_2)	$-550.0t^2 + 3.950t + 1.031$
복부두께 (Y_3)	$-197.0t_1^2 + 6.844t_1 + 0.950$
복부높이 (Y_4)	$-0.860h_1^2 + 0.517h_1 + 0.924$



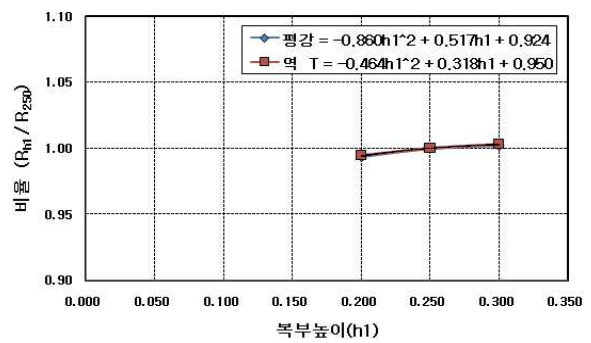
(a) Rib Space (Y_1)



(b) Plate Thickness (Y_2)



(c) Web Thickness (Y_3)



(d) Web Height (Y_4)

Fig. 10 Ratio Functions of Local Moments M_{yy} for Each Dimension

식 (8)에 Fig. 10의 리브별 함수를 적용한 경우 및 Table 8의 리브 통합 함수를 적용한 경우와 실제 국부 모멘트 M_{yy} 를 비교하고, 리브 간격별 오차율을 정리하여 나타내면 Table 9와 같다.

Table 9. Error Ratios(%) Using the Local Moment M_{yy} Ratio Functions

적용 함수	리브 형태	s=300	s=400	s=500	s=600
리브별 함수	평균 리브	-1.30 ~ 1.47	-0.90 ~ 1.46	-1.11 ~ 1.48	-1.20 ~ 1.55
	역T형 리브	-0.64 ~ 0.89	-0.31 ~ 0.47	-0.51 ~ 0.75	-0.64 ~ 0.87
리브 통합 함수	평균 리브	-1.30 ~ 1.47	-0.90 ~ 1.46	-1.11 ~ 1.48	-1.20 ~ 1.55
	역T형 리브	-1.17 ~ 0.91	-0.70 ~ 0.44	-0.73 ~ 0.30	-0.60 ~ 0.46

Table 9의 오차율을 살펴보면, 평균 리브는 -1.30%~+1.55%, 역T형 리브는 통합 전 -0.64%~+0.89%, 통합 후 -1.17%~+0.91%로 상당한 정확도를 나타내므로, 임의의 제원을 갖는 보강판의 국부 모멘트 M_{yy} 는 식 (8)과 같이

기준 보강판의 국부 모멘트 Y_0 에 각 제원 변화에 따른 비율 함수(Y_1, Y_2, Y_3, Y_4)를 곱하면 간편히 타당한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이상의 결과들로부터 리브 간격 400mm, 판 두께 12 mm, 복부 두께 10mm, 복부 높이 250mm, 플랜지 길이 100mm, 플랜지 두께 15mm인 기준 보강판의 국부 거동 값에 각각의 제원에 대한 통합 비율 함수를 곱하면, 50mm×50mm의 정사각형에 분포하중이 작용하는 임의의 제원을 갖는 보강판의 국부 처짐과 국부 모멘트에 대하여 간편하게 타당한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 적용성 검토

본 장에서는 다른 여러 가지 형태의 보강판에 대한 적용성을 살펴보기 위하여, 해석 예제 중 기준 보강판을 기본으로 재하 위치 및 보강판의 길이가 다른 경우, 선택하지 않은 임의의 제원의 개단면 리브를 갖는 경우 및 지지 조건이 다른 보강판에 대하여 본 연구에서 제안한 통합 비율 함수를 적용하고 그 타당성을 살펴보고자 한다.

5.1 재하 위치가 다른 경우

중앙점에 하중이 재하되는 경우를 기본으로 구한 본 연구의 통합 비율 함수를 Fig. 11과 같이 기준 보강판내 재하 위치가 다른 경우에 적용하고, 그 결과를 비교하면 Table 10과 같다.

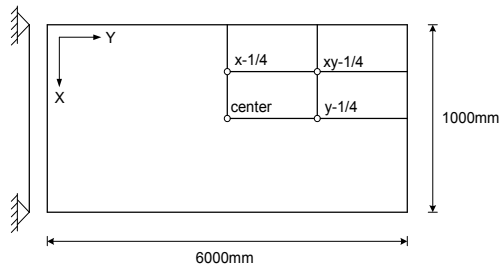


Fig. 11 Loading Positions on the Stiffened Plate

Table 10. Analyzed Results for the Different Loading Positions

리브 형태	재하 위치	국부 처짐(mm)			Mxx(kN·mm/mm)			Myy(kN·mm/mm)		
		실제	함수	오차율 (%)	실제	함수	오차율 (%)	실제	함수	오차율 (%)
평강 리브	center	18.00	17.68	-1.80	80.25	79.37	-1.09	114.9	113.5	-1.28
	x-1/4	18.08	17.68	-2.20	80.94	79.37	-1.94	115.5	113.5	-1.71
	y-1/4	18.00	17.68	-1.80	80.25	79.37	-1.09	114.9	113.5	-1.28
	xy-1/4	18.08	17.68	-2.20	80.94	79.37	-1.94	115.5	113.5	-1.71
역T형 리브	center	17.82	17.64	-1.00	79.74	78.72	-1.29	114.6	113.1	-1.28
	x-1/4	17.99	17.64	-1.92	80.53	78.72	-2.25	115.1	113.1	-1.76
	y-1/4	17.82	17.64	-1.00	79.74	78.72	-1.29	114.6	113.1	-1.28
	xy-1/4	17.99	17.64	-1.92	80.53	78.72	-2.25	115.1	113.1	-1.76

Table 10을 살펴보면, x-1/4점과 xy-1/4점에 재하된 경우 함수로 계산한 값은 일정한 반면 실제 값이 커짐에 따라 약간의 오차율 증가를 나타내나 그 양이 크지 않으며, 중앙점과 y-1/4점에 하중이 재하된 경우는 같은 결과를 나타냄을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제안한 통합 비율 함수가 재하 위치가 다른 경우에도 적용 가능함을 알 수 있다.

5.2 보강판 길이가 다른 경우

개단면 리브를 갖는 경우 가로보 간격은 도로교 설계기준⁽¹³⁾에 따르면 1.3m~2.0m를, 강교 설계의 기초⁽¹⁴⁾에 따르면 1.0m~2.0m를 사용하도록 되어 있으며, 주석범 등(2011)⁽¹⁰⁾에 따르면 국부 거동은 보강판 길이가 짧을수록 더 큰 값을 갖게 되므로, 본 연구에서도 이러한 점을 고려하여 보강판 길이 1m를 사용하였다.

제안한 통합 비율 함수를 보강판 길이가 1.5m와 2.0m인 기준 보강판에 적용한 뒤 그 결과를 비교하여 나타내면 Table 11과 같다.

Table 11. Results for Stiffened Plates with Different Lengths

리브 형태	보강판 길이	국부 처짐(mm)			Mxx(kN·mm/mm)			Myy(kN·mm/mm)		
		실제	함수	오차율 (%)	실제	함수	오차율 (%)	실제	함수	오차율 (%)
평강 리브	1000	18.00	17.68	-1.80	80.25	79.37	-1.09	115.0	113.5	-1.28
	1500	17.27	17.68	2.34	79.63	79.37	-0.32	113.0	113.5	0.48
	2000	16.61	17.68	6.43	79.06	79.37	0.39	111.1	113.5	2.20
역T형 리브	1000	17.82	17.64	-1.00	79.74	78.72	-1.29	114.6	113.1	-1.28
	1500	17.19	17.64	2.61	79.26	78.72	-0.69	113.0	113.1	0.06
	2000	16.63	17.64	6.06	78.81	78.72	-0.12	111.5	113.1	1.40

Table 11을 살펴보면, 국부 처짐은 보강판 길이가 길어짐에 따라 실제값이 작아져 오차율이 커지나 계산 결과가 더 큰 국부 처짐을 나타내어 안전측 임을 알 수 있다. 또한 국부 모멘트의 오차율 증가가 크지 않아 본 연구 결과가 보강판 길이 1.0m~2.0m 정도의 보강판에 대하여 타당한 결과를 제공해줄 수 있다.

5.3 L형 리브 보강판의 경우

다른 형태의 개단면 리브 보강판에 대한 적용성을 살펴보기 위하여 Table 12에 나타난 L형 리브를 갖는 보강판에 대한 해석을 수행하였다.

Table 12. Dimensions of Plates Stiffened with Angle Ribs (mm)

L형 리브 case	복부두께 t_1	복부높이 h_1	플랜지두께 t_2	플랜지길이 h_2	판두께 t	리브 간격 s
A	9	200	14	90	10	300
B	10	250	15	90		
C	12	250	16	90		
D	11	300	16	90		

L형 리브의 경우 하부 플랜지를 갖는 형태이므로 본 연구에서 제안한 개단면 통합 비율 함수와 역T형 리브 보강판의 초기값을 적용하였으며, 그 계산 결과를 실제 국부 거동과 비교하여 나타내면 Table 13과 같다.

Table 13을 살펴보면 본 연구 해석 예제의 역T형 리브와 유사한 오차율 범위를 나타내어 제안한 통합 비율 함수가 리

브 형태와 상관없이 L형 리브를 갖는 보강판에도 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

Table 13. Results for Plates Stiffened with Angle Ribs

L형 리브 case	국부 처짐(mm)			Mxx(kN·mm/mm)			Myy(kN·mm/mm)		
	실제	함수	오차율 (%)	실제	함수	오차율 (%)	실제	함수	오차율 (%)
A	17.96	17.64	-1.77	79.81	78.72	-1.37	114.3	113.1	-1.08
B	17.90	17.75	-0.87	80.18	79.27	-1.13	115.1	114.2	-0.74
C	17.39	17.49	0.58	80.04	79.71	-0.42	114.9	114.8	-0.10
D	17.78	17.70	-0.43	80.34	79.61	-0.92	115.4	114.8	-0.54

5.4 임의 제원을 갖는 보강판의 경우

Table 1에 나타난 제원 이외의 다른 제원을 갖는 보강판에 대하여 본 연구에서 제안한 통합 비율 함수를 적용하고 그 결과를 나타내면 Table 14와 같다.

Table 14. Results for Stiffened Plates with Arbitrary Dimensions

리브 형태	리브 제원 (mm)	국부 처짐(mm)			Mxx(kN·mm/mm)			Myy(kN·mm/mm)			
		실제	함수	오차율 (%)	실제	함수	오차율 (%)	실제	함수	오차율 (%)	
평강 리브	s	375	29.20	28.53	-2.29	89.92	88.84	-1.20	125.1	123.7	-1.11
	t	1.1	13.65	13.64	-0.02	79.44	78.67	-0.97	113.7	112.7	-0.91
	t1	18	16.55	16.59	0.24	80.01	80.30	0.36	114.6	114.7	0.11
	h1	275	18.40	17.96	-2.39	80.90	79.72	-1.45	116.0	114.4	-1.36
역T형 리브	s	375	28.65	28.47	-0.64	89.04	88.11	-1.04	124.4	123.2	-0.92
	t	1.1	13.52	13.61	0.73	78.76	78.02	-0.94	113.3	112.2	-0.94
	t1	10.5	17.47	17.46	-0.05	79.85	79.11	-0.92	114.6	113.6	-0.85
	h1	275	18.19	17.92	-1.49	80.29	79.06	-1.53	115.4	114.0	-1.17
	t2	15.5	17.85	17.64	-1.18	79.84	78.72	-1.41	114.6	113.1	-1.32
	h2	10.5	17.84	17.64	-1.09	79.83	78.72	-1.39	114.6	113.1	-1.30

Table 14를 살펴보면 해석 예제와 유사한 오차율 범위를 나타내어 제안한 통합 비율 함수가 본 연구에서 고려하지 않은 임의 제원을 갖는 경우에도 타당한 결과를 제공함을 알 수 있다.

5.5 지지 조건이 다른 보강판의 경우

지지 조건이 다른 보강판에 대한 적용성을 살펴보기 위하여, Table 15에 나타난 제원을 갖는 개단면 리브 보강판에 대하여, 보강판 폭 방향은 2변이 고정되고, 길이 방향은

Fig. 12(a)와 같이 2변이 단순 지지된 경우와 Fig. 12(b)와 같이 2변이 T-800 × 330 × 10 × 10의 가로보로 지지된 경우를 고려하였으며, 이와 같이 지지 조건이 다른 2가지 경우의 해석 결과를 본 연구 결과와 비교하였다.

Table 15. Dimensions of Analyzing Stiffened Plates (mm)

CASE	리브 간격 s	판 두께 t	복부 높이 h ₁	역T형			
				평강 복부 두께 t ₁	복부 두께 t ₁	플랜지 두께 t ₂	플랜지 길이 h ₂
A	300	10	200	10	9	14	90
B	400						
C	500						
D	600						

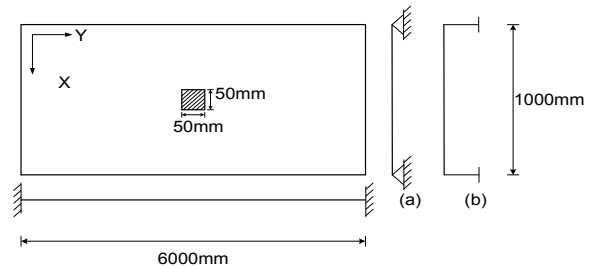


Fig. 12 Stiffened Plates with Different Support Conditions

본 연구의 비율함수는 지지 조건과 상관없이 제원에 따라 국부 거동이 산정되므로, 이 함수 값을 본 연구의 2변만 단순 지지된 보강판(Fig. 1), 2변은 고정, 2변은 단순 지지된 보강판(Fig. 12(a)), 2변 고정과 나머지 2변은 가로보로 지지된 보강판(Fig. 12(b))의 해석 결과와 비교하여 각 국부 거동별로 나타내면 Table 16~18과 같다.

국부 처짐을 나타낸 Table 16을 살펴보면, 본 연구 결과와 폭 방향까지 고정된 경우의 결과에는 차이가 없음을 알 수 있으며, 이는 국부 거동이 제한적으로 발생하게 되어 폭 방향 지지조건의 영향이 거의 없기 때문으로 파악된다. 또한 고정단과 가로보로 지지된 보강판의 경우에 발생한 최대 오차율도 본 연구 결과와 큰 차이가 없으므로, 본 연구에서 제안한 국부 처짐 함수가 지지 조건과 상관없이 타당한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

국부 모멘트 Mxx와 국부 모멘트 Myy를 비교한 Table 17과 Table 18을 살펴보면, 다른 지지 조건을 갖는 두 가지 보강판 모두 본 연구 결과와 오차율 차이가 크지 않으며, 최대 오차율 또한 작은 값을 나타내어 본 연구에서 제안한 국부 모멘트 함수가 지지 조건과 상관없이 타당한 결과를 제공할 수 있다.

Table 16. Comparison of Local Displacement Results (mm)

리브 형태	CASE	함수	본 연구		고정단 + 힌지		고정단 + 가로보	
			실제	오차율 (%)	실제	오차율 (%)	실제	오차율 (%)
평강	A	-17.72	-18.15	2.38	-18.15	2.38	-17.85	0.76
	B	-32.72	-33.43	2.13	-33.43	2.13	-31.91	0.60
	C	-51.67	-52.89	2.32	-52.89	2.32	-51.68	0.03
	D	-74.49	-75.90	1.86	-75.90	1.86	-72.94	-2.12
역T형	A	-17.80	-17.86	0.29	-17.86	0.29	-17.54	-1.53
	B	-32.76	-32.79	0.09	-32.79	0.09	-32.27	-1.52
	C	-51.87	-51.89	0.04	-51.89	0.04	-50.99	-1.73
	D	-74.50	-74.56	0.07	-74.56	0.07	-72.49	-2.78

Table 17. Comparison of Local Moment Mxx Results (kN · mm/mm)

리브 형태	CASE	함수	본 연구		고정단 + 힌지		고정단 + 가로보	
			실제	오차율 (%)	실제	오차율 (%)	실제	오차율 (%)
평강	A	79.49	80.59	1.37	80.59	1.37	80.37	1.10
	B	91.74	92.64	0.96	92.64	0.96	92.52	0.84
	C	101.36	102.14	0.77	102.14	0.77	102.16	0.78
	D	109.36	110.18	0.75	110.18	0.75	110.26	0.81
역T형	A	79.21	79.85	0.80	79.85	0.80	79.60	0.49
	B	91.37	91.72	0.38	91.72	0.38	91.59	0.24
	C	101.03	101.15	0.13	101.15	0.13	101.19	0.16
	D	109.24	109.19	-0.05	109.19	-0.05	109.33	0.08

Table 18. Comparison of Local Moment Myy Results (kN · mm/mm)

리브 형태	CASE	함수	본 연구		고정단 + 힌지		고정단 + 가로보	
			실제	오차율 (%)	실제	오차율 (%)	실제	오차율 (%)
평강	A	113.58	115.18	1.38	115.18	1.38	114.40	0.71
	B	126.67	127.94	0.99	127.94	0.99	127.25	0.46
	C	136.11	137.45	0.98	137.45	0.98	136.54	0.32
	D	143.67	144.83	0.80	144.83	0.80	143.26	-0.29
역T형	A	113.73	114.60	0.75	114.60	0.75	113.75	0.01
	B	126.71	127.21	0.40	127.21	0.40	126.52	-0.15
	C	136.43	136.72	0.21	136.72	0.21	135.93	-0.37
	D	143.98	144.14	0.11	144.14	0.11	142.83	-0.81

6. 결 론

본 연구에서는 평강 리브와 역T형 리브를 갖는 보강판의 중앙에 위치한 50mm × 50mm의 정사각형에 400kN 하중

을 작용시키고 제원 변화에 따른 국부 거동 양상을 분석한 뒤, 이를 정형화하여 비율 함수로 제안하였으며, 그 결과를 정리하여 나타내면 다음과 같다.

- (1) 개단면 리브의 하부 플랜지가 보강판의 국부 거동에 미치는 영향이 매우 작아 임의 제원을 갖는 개단면 리브 보강판의 국부 처짐과 국부 모멘트는 리브 간격, 판 두께, 복부 두께, 복부 높이에 대한 비율 함수로 표현할 수 있었다.
- (2) 리브 형태와 상관없이 리브 간격, 판 두께, 복부 두께, 복부 높이에 대한 비율 함수가 유사한 값을 나타내어 하나의 함수로 대표할 수 있었으며, 이를 이용하여 개단면 리브 보강판의 국부 처짐과 국부 모멘트를 산정하여 비교한 결과 타당한 결과를 제공함을 알 수 있었다.
- (3) 해석 예제에서 고려하지 않은 제원의 보강판과 지지 조건이 다른 보강판 등에 대하여 본 연구의 통합 비율 함수를 적용한 결과 오차율 증가가 크지 않아 본 연구의 적용성을 확인 할 수 있었다.

따라서, 50mm × 50mm의 정사각형에 분포하중이 작용하는 임의 제원의 개단면 리브를 갖는 보강판에 대하여, 본 연구에서 제안한 통합 비율 함수를 사용하면 보강판 제원과 상관없이 간편하게 타당한 국부 처짐과 국부 모멘트 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되며, 재하 크기에 따른 경향은 추후 더 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌 (References)

- [1] 박호상, 서상정, 권영봉(2010) 국부좌굴과 뒤틀림좌굴이 발생하는 종방향 보강재로 보강된 강판의 압축강도, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제3호, pp. 219-228.
Park, H.S., Seo, S.J., and Kwon, Y.B. (2010) The Compressive Strength of Longitudinally Stiffened Plates Undergoing Local and Distortional Buckling, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 22, No. 3, pp. 219-228 (in Korean).
- [2] 선창원, 박경진, 경갑수, 김교훈(2008) 세로리브 내부 보강상세에 따른 강바닥판 연결부의 피로거동 특성에 관한 해석적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제1호, pp.105-119.
Sun, C.W., Park, K.J., Kyung, K.S., and Kim, K.H. (2008) Analytical Study on the Characteristic of Fatigue Behavior in Connection Parts

- of Orthotropic Steel Decks with Retrofitted Structural Details in Longitudinal Rib, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 1, pp.105-119 (in Korean).
- [3] 오순택(2006) 강바닥판교의 설계 및 시공성 향상 방안: 강바닥판교 3차원 실물 모형체의 피로강도, *한국강구조학회 논문집*, 한국강구조학회, 제18권, 제1호, pp.23-32.
Oh, S.T. (2006) Improvement of the Design and Construction Technique of Orthotropic Steel Deck Bridges: Fatigue Strength of Three Dimensional Full-Scaled Model, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 18, No. 1, pp. 23-32 (in Korean).
- [4] 최준혁, 김성훈(2005) 강바닥판에서의 종리브와 횡리브 교차부의 국부응력 및 피로균열 평가, *대한토목학회 논문집*, 대한토목학회, 제25권, 제6A호, pp.1053-1060.
Choi, J.H. and Kim, S.H. (2005) Evaluation of Local Stresses and Fatigue Crack of Longitudinal Rib to Cross Beam Joints in Orthotropic Steel Deck, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 25, No. 6A, pp.1053-1060 (in Korean).
- [5] Hambly, E.C. (1991) Bridge Deck Behaviour, 2nd Ed., E & FN SPON An Imprint of Chapman & Hall, U.S.A.
- [6] Troitsky, M.S. (1992) Orthotropic Bridges : Theory and Design, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, U.S.A.
- [7] 정충열(2008) 직교이방성 판요소를 이용한 개단면 리브 보강판의 정적 해석, 석사학위논문, 세명대학교.
Jeong, C.Y. (2008) The Static Analysis of Plates Stiffened with Open Ribs Using the Orthotropic Plate Element, M. S. dissertation, Semyung University, Korea (in Korean).
- [8] 주석법(2007) 리브 제원을 고려한 평강 리브 보강판의 직교이방성 휨 강성 수정 계수, *한국강구조학회 논문집*, 한국강구조학회, 제19권, 제2호, pp.161-170.
- Chu, S.B. (2007) The Modified Coefficient of the Orthotropic Flexural Rigidity for Stiffened Plates with Rectangular Ribs Considering the Dimensions of Ribs, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 19, No. 2, pp.161-170 (in Korean).
- [9] 주석법, 임관혁(2007) 변형 형상을 고려한 평강 리브 보강판의 직교이방성 휨강성 산정, *한국강구조학회 논문집*, 한국강구조학회, 제19권, 제6호, pp.621-632.
Chu, S.B. and Im, K.H. (2007) Estimation of Orthotropic Flexural Rigidities Considering the Deformed Shape for a Plate Stiffened with Rectangular Ribs, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 19, No. 6, pp.621-632 (in Korean).
- [10] 주석법, 박종해(2011) 개단면 리브 보강판의 국부거동 분석을 위한 모델, 2011년 *학술대회발표집*, 한국강구조학회, 제22권, 제1호, pp.229-230.
Chu, S.B. and Park, J.H. (2011) Model for Analyzing the Local Behavior of Plates Stiffened with Open Ribs, *Proceedings of Annual KSSC Conference*, KSSC, Vol. 22, No. 1, pp.229-230 (in Korean).
- [11] 마이더스 아이티(2006) 마이더스로 배우는 구조역학, 기문당.
MIDAS I.T. (2006) *Structural Analysis by Midas*, Kimoonang, Korea.
- [12] 최창근(2002) 유한요소법, 테크노프레스.
Choi, C.K. (2002) *Finite Element Method*, Techno-Press, Korea.
- [13] 한국도로교통협회(2010) 도로교설계기준, 건설정보사.
K .R. T. A. (Korea Road & Transportation Association) (2010) *Design Code for Road Bridges*, Construction Information, Korea.
- [14] 방명석(1993) 강교설계의 기초, 도서출판 건설도서.
Bang, M.S. (1993) *Basic of the Steel Bridge Design*, Books of the Construction, Korea.

요약 : 본 연구에서는 개단면 리브 보강판에 대하여 여러 가지 제원 변화에 따른 국부 처짐과 국부 모멘트를 정형화하고자 하였다. 평강 리브와 역T형 리브를 갖는 여러 가지 보강판을 분석한 결과, 하부 플랜지가 국부 거동에 미치는 영향이 매우 작아 국부 거동은 리브 간격, 복부 두께와 높이, 판 두께에 대한 비율 함수로 표현할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 평강 리브와 역T형 리브를 갖는 보강판의 비율 함수가 유사한 결과를 나타내어 하나의 비율 함수로 통합 가능하였으며, 이를 적용한 결과 타당한 결과를 나타내었다. 다른 형태의 보강판에 비율 함수를 적용한 결과, 오차율 증가가 크지 않아 본 연구의 적용성을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 국부 거동에 대한 비율 함수식을 이용하면, 개단면 리브를 갖는 보강판의 국부 처짐과 국부 모멘트에 대하여 제원과 상관없이 간편하게 타당한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 개단면 리브 보강판, 국부 처짐, 국부 모멘트, 국부 거동, 비율 함수, 보강판 제원