

# 플레이트 거더의 수평보강재 보강 위치

손병직<sup>†</sup> · 허용학<sup>\*</sup>

건양대학교 건설시스템공학과 · <sup>\*</sup>한국표준과학연구원 신재생에너지측정센터  
(2009. 4. 30. 접수 / 2009. 7. 6. 채택)

## Reinforcement Location of Plate Girders with Longitudinal Stiffeners

Byung Jik Son<sup>†</sup> · Yong Hak Huh<sup>\*</sup>

Department of Civil Engineering, Konyang University

<sup>\*</sup>Korea Research Institute of Standards and Science

(Received April 30, 2009 / Accepted July 6, 2009)

**Abstract** : Unlike concrete bridge, steel bridge resists external force by forming thin plate. Thus, because steel girder bridge has big slenderness ratio, buckling is a major design factor. Plate girder consists of flange and web plate. Because of economic views, web plate that resists shear forces is made by more thinner plate. Thus, web plate has much risk for buckling. The objective of this study is to analyze the buckling behaviors of plate girder and to present the proper reinforcement location of longitudinal stiffeners. Various parametric study according to the change of web height, transverse stiffeners and load condition are examined.

**Key Words** : plate girder, steel bridge, longitudinal stiffeners, transverse stiffeners, buckling behaviors

### 1. 서론

강교량의 특징은 콘크리트교량과는 달리 기본적으로 박판(薄板)을 보강하여 구조체를 형성함으로써 외력에 저항한다. 이러한 강교량은 세장성이 크기 때문에 좌굴 발생 가능성이 크며, 콘크리트교량과 달리 좌굴이 중요한 설계 인자이다.

플레이트 거더는 휨에 저항하는 플랜지와 전단에 저항하는 복부판으로 구성되어 있는 강교량의 형태이다. 전단에 저항하는 복부판은 경제적인 측면뿐만 아니라 전단이 휨에 비해 작기 때문에 얇게 제작한다. 따라서, 복부판은 좌굴 위험성이 더욱 커지게 되어 좌굴에 대해 보강하지 않으면 안된다. 복부판이 얇기 때문에 항복하기 전에 국부좌굴이 먼저 발생한다. 좌굴강성을 높이기 위해서는 복부판 두께를 크게 하거나, 보강재를 설치한다. 경제적인 측면에서 주로 보강재를 설치한다<sup>1-3)</sup>.

복부판의 좌굴강성을 증가시키기 위한 연구가 많이 이루어져 왔지만<sup>4-10)</sup>, 이전의 연구들은 플레이트 거더의 일부분 즉, 복부판만을 모델링하여 결과를 도출하는 경우가 대부분이다. 이러한 연구결과는

복부판만을 모델링했기 때문에 실제 플레이트 거더의 하중형태나 지점조건 등이 제대로 반영이 안 되는 문제점을 내포하고 있다. 최근 손병직 등<sup>11)</sup>은 플레이트 거더 전체를 모델링하여 해석을 수행하였으나, 하중조건이 집중하중만 고려하였으며, 다양한 파라미터 연구는 이루어지지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 플레이트 거더 전체를 모델링하여 해석을 수행하여 수평보강재의 합리적 보강 위치를 제시하고, 또한, 도로교설계기준<sup>12)</sup>과 많은 연구에서 수평보강재의 최적 위치가  $0.2h_w$ 로 제시된 경우와 비교·분석하고자 한다. 파라미터 연구로 다양한 하중조건 고려, 수직보강재 개수의 변화, 복부판의 높이 변화 등을 고려하였다.

### 2. 기본 이론

플레이트 거더의 복부판에는 Fig. 1과 같이 휨응력뿐만 아니라 전단응력이 동시에 작용하므로 합성작용에 의한 국부좌굴을 반드시 고려하여야 하며, 필요시 복부판의 두께를 늘이거나 보강재를 설치하여 좌굴강도를 증가시켜야 한다. 휨응력  $\sigma$ 와 전단응력  $\tau$ 가 함께 작용할 때 좌굴에 대한 상관관계식은 다음과 같다<sup>4,5,10,11)</sup>.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
strustar@konyang.ac.kr

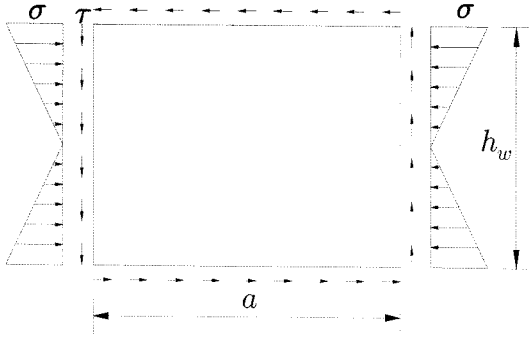


Fig. 1. Web plate under bending and shear stresses.

$$\left[ \frac{\sigma}{\sigma_{cr}} \right]^2 + \left[ \frac{\tau}{\tau_{cr}} \right]^2 \leq 1 \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{cr}$ ,  $\tau_{cr}$ 은 4변 단순지지 판에 힘응력 및 전단응력이 각각 단독으로 작용했을 경우의 좌굴 응력이며, 식(2), (3)과 같다.

$$\sigma_{cr} = \frac{k_b \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_w} \right)^2, \text{ where : } k_b = 23.9 \text{ for pure bending (minimum)} \quad (2)$$

$$\tau_{cr} = \frac{k_s \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_w} \right)^2, \text{ where : } k_s = 5.34 + \frac{4.00}{\phi^2} \text{ for } \phi \geq 1 \quad (3)$$

여기서,  $\phi$ 는 형상비(aspect ratio)로서,  $\phi = ah_w$ 이다.

휨과 전단을 동시에 받는 좌굴계수  $k$ (휨:  $k_b$ , 전단:  $k_s$ )는 여러 요인에 의해서 변한다. 하중조건, 즉 휨이 지배적이냐 전단이 지배적이냐에 따라서, Fig. 1의 4변의 경계조건에 따라서 변하며, 복부판의 두께, 수직보강재의 간격, 형상비, 수평보강재의 위치 등에 의해서도 변한다.

### 3. 연구 방법

해석 모델은 Fig. 2와 같이 수직보강재 및 수평보강재로 보강된 플레이트 거더이며, 플레이트 거더의 상세는 Fig. 3과 같다. 수치해석에 사용되는 기본적인 치수는 Table 1과 같으며, Table 1에 나타난 바와 같이 해석 파라미터로서 복부판의 높이 ( $h_w$ ), 수직보강재의 개수( $n_{sv}$ ) 및 수평보강재의 위치 ( $h_{sh}$ )를 선정하였다. 또한, 하중조건 변화에 따른 결과도 분석하였다. Fig. 4와 같이 하중조건을 3가지,

즉, Lcase A는 중앙에 집중하중이 재하된 경우이며, Lcase B는 부분 등분포하중이 재하된 경우이고, Lcase C는 상부 플랜지 전체에 등분포하중이 재하된 경우로 설정하였다. Lcase B의 부분 등분포하중은  $2L/5 \sim 3L/5$ 에 재하된 경우로 설정하였다.

플레이트 거더의 좌굴 거동과 수평보강재의 합리적 보강위치를 제시하고자 유한요소해석을 수행하였으며, 프로그램은 ANSYS 11.0을 사용하였다<sup>13)</sup>. ANSYS 프로그램의 APDL을 사용하여 파라미터 연구를 수행하였다. 4노드를 갖는 SHELL181 요소를 사용하여 모델링하였으며, 기본적으로 요소의 수는 21,511개, 노드의 수는 21,766개이다.

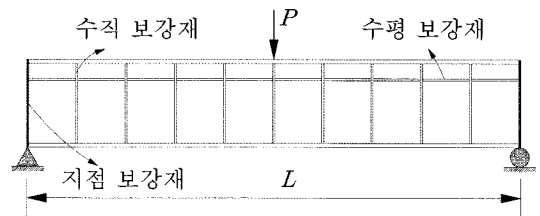


Fig. 2. Plate girder with stiffeners(Lcase A,  $n_{sv}=9$ ).

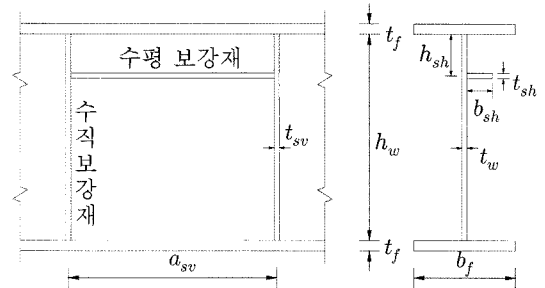


Fig. 3. Detail of plate girder.

Table 1. Basic dimension (units : mm)

기호	치수
길이	L
플랜지 폭	$b_f$
복부판 높이	$h_w$
지점보강재 두께	$t_{se}$
플랜지 두께	$t_f$
복부판 두께	$t_w$
수평보강재 폭	$b_{sh}$
수평보강재 두께	$t_{sh}$
수평보강재 위치	$h_{sh}$
수직보강재 폭	$b_{sv}$
수직보강재 두께	$t_{sv}$
수직보강재 간격	$a_{sv}$
	$L/(n_{sv} + 1)$ ( $n_{sv} = 0 \sim 19$ )

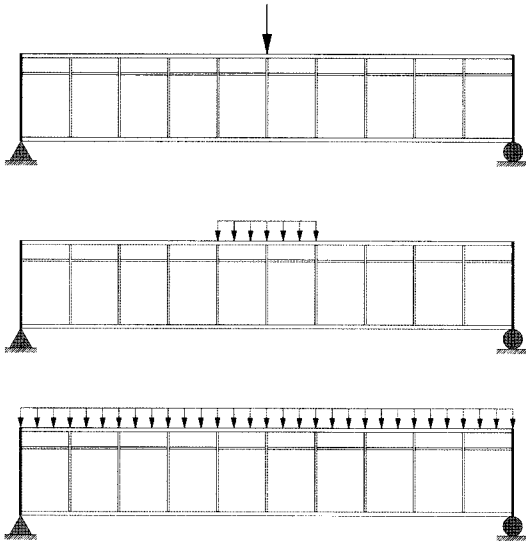


Fig. 4. Load case (Lcase A, B, C).

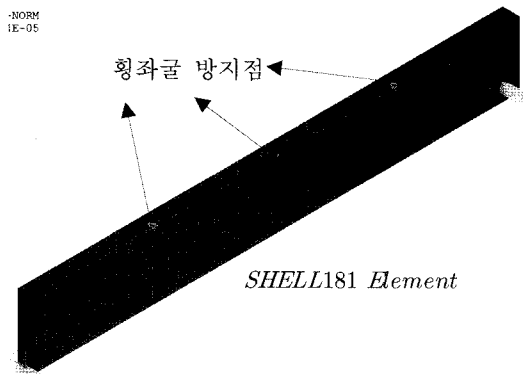


Fig. 5. Finite element model of plate girder (Lcase B,  $n_{sv} = 8$ ).

ANSYS를 사용한 유한요소 모델은 Fig. 5와 같다. Fig. 5는 수직보강재의 개수( $n_{sv}$ )가 짝수인 8개이며, Fig. 2는 수직보강재의 개수( $n_{sv}$ )가 홀수인 9개이다. Lcase A일 경우 Fig. 2처럼  $n_{sv}$ 가 홀수이면 수직보강재가 하중작용점에 위치한 경우이며, 짝수이면 그렇지 않은 경우이다. 사용재료는 구조용 강재 SWS490을 사용하였으며, 탄성계수  $E_s = 200\text{GPa}$ , 프아송비  $\nu = 0.3$ 이다.

#### 4. 해석 에 및 결과분석

##### 4.1. 개요

Fig. 2와 같은 플레이트 거더는 복부판의 국부좌굴 이전에 횡좌굴이 먼저 발생한다. 도로교설계기

준<sup>12)</sup>에 의하면 압축플랜지가 콘크리트바닥판 등에 직접 고정되어 있는 경우 및 박스형 단면,  $I$ 형 단면과 같이 횡좌굴이 일어나기 어려운 경우 허용휨 압축응력은 허용인장응력과 같게 제시되어 있어 횡좌굴 위험이 없는 경우로 간주할 수 있도록 되어 있다.

본 연구는 복부판의 국부좌굴 강성에 유리하도록 수평보강재의 위치를 결정하는 것이기 때문에 압축플랜지가 콘크리트바닥판에 직접 고정되어 있는 것으로 가정하였다. 따라서, 횡좌굴이 발생하지 않도록 Fig. 5와 같이 횡좌굴 강제 방지점을  $L/4$ ,  $2L/4$ ,  $3L/4$ 로 설정하여 횡방향으로 고정시켰다.

##### 4.2. 복부판의 높이 변화

Table 2는 복부판의 높이 변화에 따른 결과를 나타낸 것이다. 가로축은 좌굴계수( $k$ )를, 세로축은 수평보강재 위치( $h_{sh}/h_w$ )를 나타내며, 세로축 0은 수평보강재가 없는 것을 의미한다. 플랜지의 폭( $b$ )을 Table 1과 같이  $400\text{mm}$ 로 고정시키고  $h_w/b_f$ 를 3~5로 변화시켜가면서 해석을 수행하였다.

Table 2의 Lcase A는 집중하중이 재하된 경우이며,  $n_{sv} = 9$ (홀수)는 집중하중 재하점(중앙)에 수직보강재가 있는 경우로서 그렇지 않은 경우( $n_{sv} = 8$ (짝수))보다 좌굴계수가 2배 이상 크게 나타났다. 복부판의 높이( $h_w/b_f$ )가 커질수록 합리적인 수평보강재 위치도 약간 위로 올라가는 경향이 있으나, 대체적인 합리적인 위치는  $(0.24 \sim 0.26)h_w$ 로 나타났다.

Table 2의 Lcase B는 부분 등분포하중이 재하된 경우이며,  $h_{sh} = 0.26h_w$ 일 때 가장 유리하게 나타났다.

Table 2의 Lcase C는 전체 등분포하중이 재하된 경우이며, 합리적인 수평보강재 위치는  $0.42h_w$ 근처인 것으로 나타났다. 이처럼 Lcase C의 경우 수평보강재의 합리적인 위치가 밑으로 내려간 이유는 중앙부의 휨에 대한 국부좌굴 이전에 지점부의 전단에 대한 국부좌굴이 먼저 발생하였기 때문이다. 등분포하중에 대해서는 4.4절에서 자세하게 다루고자 한다.

##### 4.3. 수직보강재 개수 변화

본 절에서는 수직보강재 개수의 변화 즉, 형상비 변화에 따른 결과를 분석하였다. 수직보강재의 개수 및 복부판의 높이에 따른 형상비를 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Buckling coefficient by  $h_w/b_f$  ratio

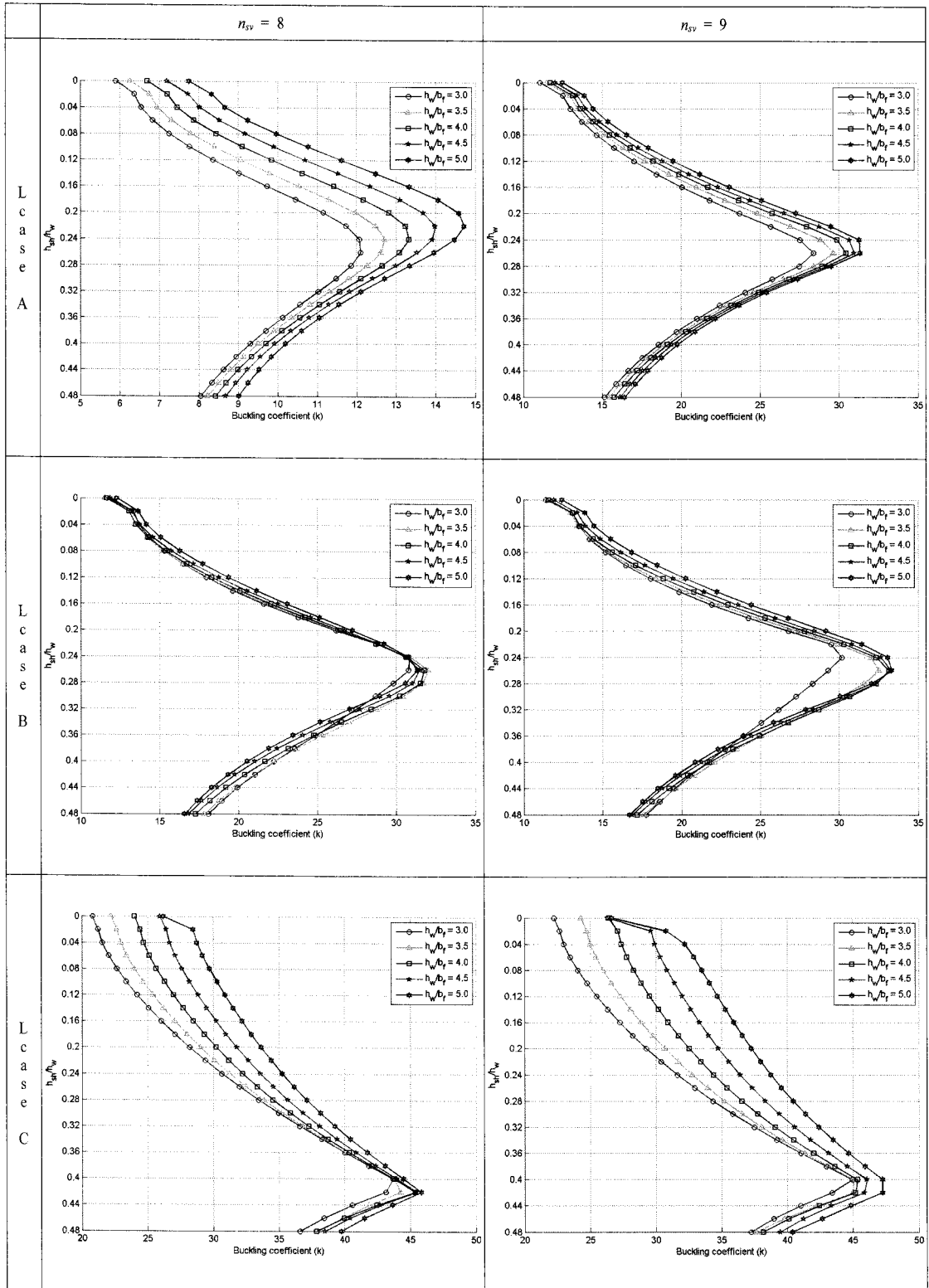


Table 3. The aspect ratio( $\phi$ ) of plate girder

$n_{sv}$	$a_{sv}$	$a_{sv}/h_w$ (aspect ratio)		
		$h_w = 3b_f$	$h_w = 4b_f$	$h_w = 5b_f$
3	3000.0	2.50	1.88	1.50
4	2400.0	2.00	1.50	1.20
5	2000.0	1.67	1.25	1.00
6	1714.3	1.43	1.07	0.86
7	1500.0	1.25	0.94	0.75
8	1333.3	1.11	0.83	0.67
9	1200.0	1.00	0.75	0.60
10	1090.9	0.91	0.68	0.55
11	1000.0	0.83	0.63	0.50
12	923.1	0.77	0.58	0.46
13	857.1	0.71	0.54	0.43
14	800.0	0.67	0.50	0.40
15	750.0	0.63	0.47	0.38
16	705.9	0.59	0.44	0.35
17	666.7	0.56	0.42	0.33
18	631.6	0.53	0.39	0.32
19	600.0	0.50	0.38	0.30

Table 4는 수직보강재 개수의 변화에 따른 결과를 나타낸 것이다. 첫 번째 열은 중앙에 집중하중이 재하된 경우(Lcase A)의 결과를, 두 번째 열은 부분 등분포하중이 재하된 경우(Lcase B)의 결과를 나타낸 것이다.

수직보강재의 개수가 커질수록 즉, 형상비가 작아질수록 합리적인 수평보강재의 위치는 위로 올

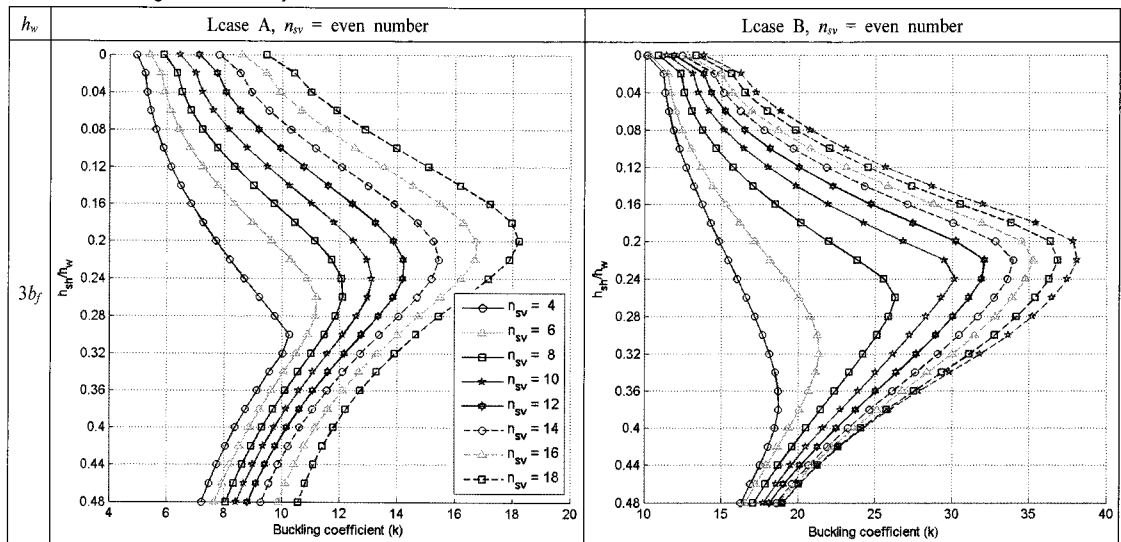
라가는 것으로 분석되었다. 또한, 복부판의 높이가 커질수록 합리적인 수평보강재의 위치는 집중하중의 경우(Lcase A)는 약간 위로 올라가지만, 부분 등분포하중의 경우(Lcase B)는 위치 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

도로교설계기준에 의하면 형상비( $a_{sv}/h_w$ )는 지점부에서는 1.5 이하로, 그 밖에는 3.0 이하로 하도록 되어 있고, 통상적으로 형상비를 1.0 전후로 설계하고 있다. Table 3을 참조하면 형상비 1.0 전후의 수직보강재 개수는  $h_w = 3b_f$ 일 때는 7~11개,  $h_w = 4b_f$ 일 때는 4~8개,  $h_w = 5b_f$ 일 때는 3~7개이다. 이를 토대로 합리적인 수평보강재의 위치를 도출해보면 집중하중이 재하될 경우(Lcase A)는  $0.26h_w$ 부근이며, 부분 등분포하중이 재하될 경우(Lcase B)는  $h_w = 3b_f$ 일 때는  $0.24h_w$ 부근, 그 밖에는  $0.28h_w$ 부근으로 분석되었다.

#### 4.4 등분포하중의 영향

4.2절에서 전체 등분포하중이 재하된 경우(Lcase C), 합리적인 수평보강재 위치가  $0.42h_w$ 근처로 나타난 이유는 Fig. 6과 같이 중앙부의 휨에 대한 국부좌굴 이전에 지점부의 전단에 대한 국부좌굴이 먼저 발생하였기 때문으로 분석되었다. Fig. 6(a)는 수평보강재가 없을 경우의 지점부의 좌굴형상을, Fig. 6(b)는 수평보강재 위치가  $0.42h_w$ 근처이며, 이때 지점부에 Nodal Line이 형성되면서 Fig. 6(c)의 중앙부의 좌굴로 옮겨지는 거동을 나타낸다.

Table 4. Buckling coefficient by the number of transverse stiffeners



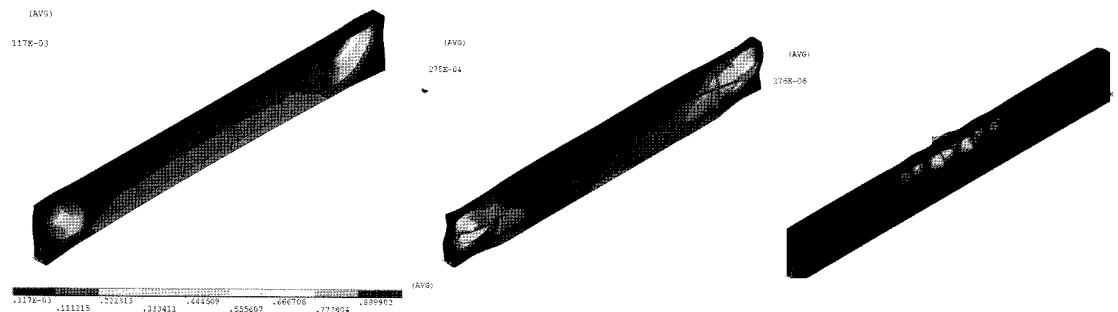
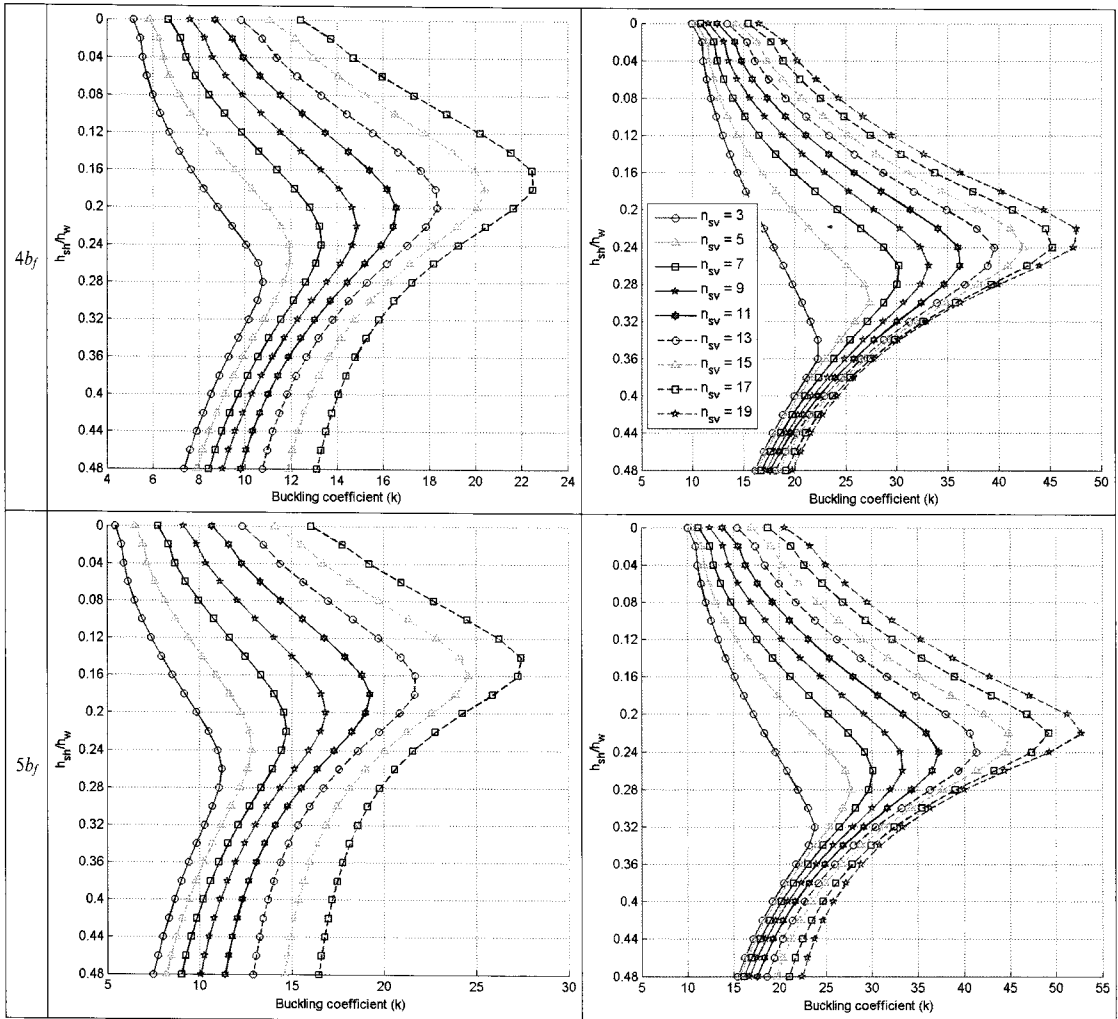


Fig. 6. (a)(b)(c) Buckling shape of Lcase C ( $h_w = 4b_t$ ,  $n_{sv} = 6$ ).

Fig. 7은 지점부 전단좌굴에 대한 합리적인 보강 위치를 찾기 위해서 해석을 수행한 결과이다.  $h_{she}$ 는 지점부와 인접한 수직보강재 사이의 수평보강재의 위치를 나타내며, 나머지 수평보강재의 위치

는 그림의 세로축이다. 다양한 해석을 수행한 결과 지점부 전단좌굴에 대한 합리적인 보강 위치( $h_{she}$ )는  $0.46h_w$ 로 나타났다. Fig. 7은 다양한 해석에서 샘플만을 나타낸 것이다.

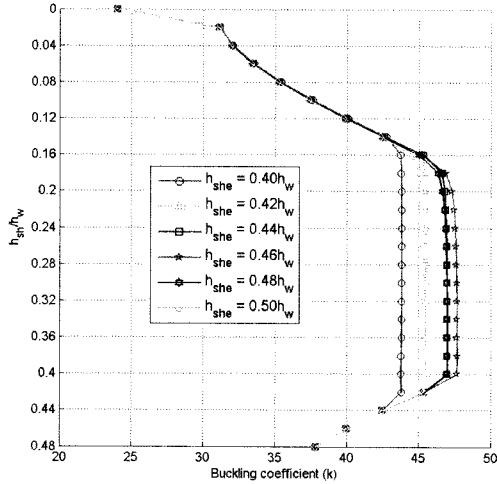
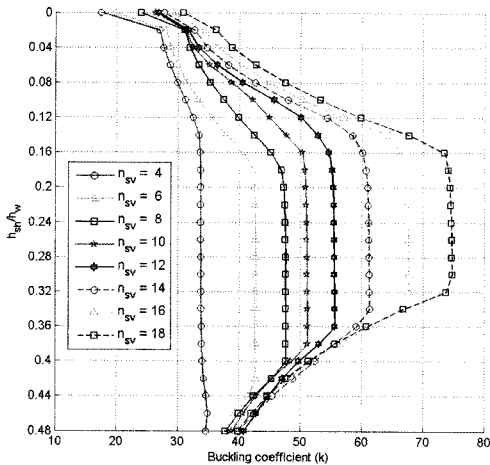
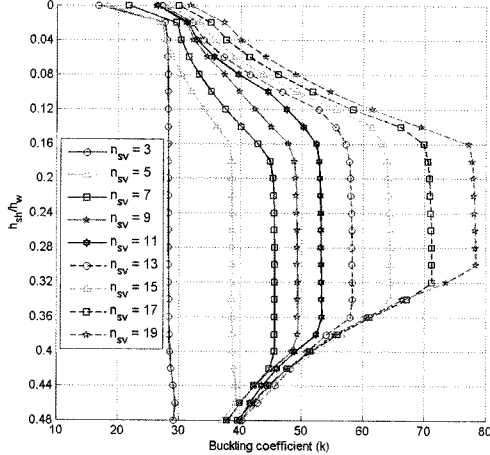


Fig. 7. Support reinforcement of longitudinal stiffeners ( $h_w = 4b_f$ ,  $n_{sv} = 8$ ).



(a)  $n_{sv}$  : even number



(b)  $n_{sv}$  : odd number

Fig. 8. Buckling coefficient of Lcase C ( $h_{she} = 0.46h_w$ ,  $h_w = 4b_f$ ).

Fig. 8은  $h_{she} = 0.46h_w$ ,  $h_w = 4b_f$ 일 때의 좌굴계수 결과를 나타낸 것이다. 지점부에 적절한 전단좌굴 보강후에 합리적인 수평보강재 위치는  $0.2h_w \sim 0.3h_w$ 로 분석되었다.

### 5. 결론

본 연구는 다양한 파라미터 연구를 통해서 합리적인 수평보강재의 위치에 대해서 고찰을 하였다. 복부판의 높이 변화, 형상비의 변화, 하중조건의 변화 등 다양한 파라미터 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 중앙에 집중하중이 재하된 경우, 하중 작용점에 수직보강재가 있는 경우가 없는 경우보다 좌굴 계수가 2배 이상 크게 나타났다.

2) 복부판의 높이가 커질수록 합리적인 수평보강재의 위치가 약간 위로 올라가는 경향이 있으며, 합리적인 위치는  $(0.24 \sim 0.26)h_w$ 로 나타났다.

3) 수직보강재의 개수가 많을수록, 즉 형상비가 작아질수록 합리적인 수평보강재의 위치가 약간 위로 올라가는 경향이 있으며, 통상적으로 설계할 때의 형상비가 1.0전후인 것을 감안하면 합리적인 수평보강재의 위치는  $(0.24 \sim 0.28)h_w$ 로 나타났다.

4) 전체 등분포하중이 재하된 경우(Lcase C)의 좌굴거동은 중앙부의 힘에 대한 국부좌굴 이전에 지점부의 전단에 대한 국부좌굴이 먼저 발생하며, 지점부의 전단좌굴에 대한 합리적인 보강위치는  $h_{she} = 0.46h_w$ 로 나타났다. 이렇게 지점부에 적절한 전단좌굴에 대한 보강후의 합리적인 수평보강재의 위치는  $(0.20 \sim 0.30)h_w$ 로 나타났다.

5) 더 많은 연구가 필요하겠지만, 본 연구를 토대로 수평보강재의 합리적인 위치를 제시하면, 집중하중과 등분포하중이 동시에 재하되고 수평보강재의 위치와 하중작용점의 위치가 같지 않고 형상비가 1.0 전후이며, 지점부의 전단좌굴이 적절하게 보강된 경우가 현실적인 조건이기 때문에 수평보강재의 합리적인 위치는  $(0.24 \sim 0.26)h_w$ 로 판단된다.

6) 도로교설계기준에서 제시된 1단 수평보강재의 위치  $0.20h_w$ 는 휨모멘트만 고려할 경우의 합리적 위치이기 때문에, 휨모멘트와 전단력을 동시에 받는 실제 플레이트 거더의 수평보강재의 위치는 본 연구에서 연구된 것처럼  $0.20h_w$  보다 아래쪽  $0.26h_w$  근처에 배치하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 1) Charles, G. Salmon, John E. Johnson, "Steel Structures (Design and Behavior)", HarperCollins College Publishers, 4th ed., 1996.
- 2) Narendra Taly, "Design of Modern Highway Bridges", 1997.
- 3) 방명석, "강교설계의 기초", 건설도서, 1993.
- 4) 윤동용, 김경식, "수평보강재가 설치된 플레이트 거더의 휨 연성에 관한 연구", 한국강구조학회 논문집, 제19권, 제6호, pp. 643~653, 2007.
- 5) Graciano, C., "Ultimate resistance of longitudinally stiffened webs subjected to patch loading", Thin-Walled Structures, Vol. 41, pp. 529~541, 2003.
- 6) Graciano, C., Johansson B., "Resistance of longitudinally stiffened I-girders subjected to concentrated loads", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59, pp. 561~586, 2003.
- 7) Graciano, C., Lagerqvist, O., "Critical buckling of longitudinally stiffened webs subjected to compressive edge loads", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59, pp. 1119~1146, 2003.
- 8) Graciano, C., Casanova, E., "Ultimate strength of longitudinally stiffened I-girder webs subjected to combined patch loading and bending", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 61, pp. 93~111, 2005.
- 9) Alinia, M. M., "A study into optimization of stiffeners in plates subjected to shear loading", Thin-Walled Structures, Vol. 43, pp. 845~860, 2005.
- 10) Alinia, M. M., Moosavi, S. H., "A parametric study on the longitudinal stiffeners of web panels", Thin-Walled Structures, Vol. 46, pp. 1213~1223, 2008.
- 11) 손병직, 허용학, "플레이트 거더의 좌굴에 대한 수평보강재 보강효과", 대한토목학회 2008 정기학술대회 논문집, P2-027, pp. 2344~2347, 2008.
- 12) 도로교설계기준·해설, 대한토목학회, 2003.
- 13) ANSYS version 11.0, Structural Analysis Guide, 2006.