

# 높이가 변하는 플레이트거더의 극한전단강도

## Ultimate Shear Strength of Tapered Steel Plate Girders

이두성\* · 박찬식\*\* · 이성철\*\*\*  
Lee, Doo Sung · Park, Chan Sik · Lee, Sung Chul

### Abstract

Plate girders with variable depths have been often used at piers considering not only the economy but also an aesthetic aspect. Tapered plate girders exhibit more complicated behaviors than prismatic girders especially under shear. However, a comprehensive design method for the determination of the shear strength has yet to be developed mainly due to lack of study. In this study, investigated is the buckling and ultimate behaviors of tapered plate girders subjected to shear through finite element analyses. From the analysis results, a simple design formula is suggested for the evaluation of the shear strength of tapered plate girders.

**Keywords** : tapered web, steel plate girder, elastic shear buckling, ultimate shear strength, F. E. M

### 요 지

정 · 부모멘트 사이의 효과적인 휨강성분배를 통한 경제적인 단면을 설계하고 하부플랜지의 교축방향 곡선화를 통한 교량의 미를 도모하기 위해, 강플레이트거더 교각부에서 높이가 변하는 복부판을 설계에 종종 반영하고 있다. 이 같은 높이가 변하는 플레이트거더의 전단거동은 일반적인 플레이트거더에 비해 복잡하다. 그러나 관련연구의 부족으로 현행 하중-저항계수설계규정은 명확한 전단설계기준을 제시하고 있지 못하다. 본 연구에서는 전단력을 받는 높이가 변하는 복부판의 탄성좌굴 및 극한전단거동을 조사하기 위해 다양한 매개변수가 고려된 3차원 유한요소해석이 수행되었으며, 해석결과로부터 높이가 변하는 복부판의 전단강도를 간단하며 합리적으로 산정할 수 있는 전단설계식을 제안하였다.

**핵심용어** : 변단면 복부판, 강플레이트 거더, 탄성전단좌굴, 극한전단강도, 유한요소법

### 1. 서 론

강플레이트 거더 연속교에서 하중에 의해 발생하는 휨모멘트의 분포는 일반적으로 지점부가 크고 상대적으로 정모멘트 구간에서는 작다. 따라서 정모멘트 구간과 부모멘트 구간에서 단면의 강성을 달리하는 데 단면의 강성결정은 각 부재의 두께를 변화시키는 방법과 단면의 높이를 변화시켜서 휨강성을 변화하는 2가지 방법으로 구분할 수 있다. 후자의 경우는 하부플랜지를 곡선화 하여 교량의 미적인 면을 동시에 추구할 수 있다는 장점으로 인해 많이 적용되고 있다. 그림 1은 연속교의 교각부 부모멘트 구간에서 적용된 변단면 복부판의 예를 보여주고 있다.

그러나 국내외적으로 제정된 허용응력법이나 하중-저항계수설계법에 관한 강교량 설계규정에 있어서 그림 1과 같이 높이가 변하는 복부판에 관한 전단설계규정이 명확하게 제시되지 못하고 있으며, 탄성전단좌굴이나 극한전단강도에 관한 연구도 상대적으로 미흡한 상태이다. 허용응력설계법을



그림 1. 변단면복부판의 적용 예

반영하는 국내의 경우 높이가 변하는 복부판의 휨이나 전단 설계는 복부판 양단의 평균높이를 기준으로 하여 허용응력을 검토하고 있으며, 복부판의 양단에서 높이 변화가 상대적으로 크지 않은 범위 내에서 제한적으로 적용하고 있는 실정이다. 하중-저항계수 설계 시방서인 AASHTO LRFD

\*정회원 · 동국대학교 토목환경공학과 박사후과정 · 공학박사(E-mail: lds1970@dongguk.edu)  
\*\*정회원 · 동국대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail: cspark1972@dongguk.edu)  
\*\*\*정회원 · 동국대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사(E-mail: sclee@dongguk.edu)

(2004)에서도 높이가 변하는 단면에 관해서는 휨설계 방법에서 비조밀단면으로 분류하여 단면의 공칭휨모멘트를 항복모멘트로 설계하라는 규정은 제시되었지만, 전단설계에 있어서는 일반적인 직사각형 판과 동일하게 설계하도록 제시하고 있다. 그러나 최근 이론 및 실험연구에서 높이가 변하는 복부판의 극한전단강도는 기하학적인 특성에 영향을 받는 것으로 조사되었다. 또한 SSRC Guide(1998)에서도 건축물에 사용되는 기둥이나 보 부재에 관한 축부재로서의 높이가 변하는 부재에 관한 연구는 진행되고 있으나, 교량에서와 같은 세장한 부재에서 높이가 변하는 패널에 관한 극한전단거동에 관한 연구가 미흡하다고 지적하고 있다.

본 연구에서는 양단의 높이가 선형적으로 변하는 복부판에 대한 선형 및 비선형 유한요소해석을 통하여 전단탄성좌굴 강도와 극한전단거동에 관하여 검토하여, 높이가 변하는 복부판의 기하학적인 제원에 따른 공칭전단강도를 산정하는 합리적인 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 문헌고찰

변단면복부판의 극한전단거동에 관한 연구는 제한적으로 수행되었다. Falby and Lee(1976)는 Basler(1963)의 사인장 이론을 바탕으로 높이가 변하는 복부판의 전단강도를 산정하는 근사적인 방법을 제시하였다. 그림 2와 같이 높이가 변하는 복부판의 사인장 영역을 가정하여 직사각형 패널에 관한 AISC 전단설계강도(A-G3-2)에서 형상비산정 기준을 수정하여 전단강도를 계산하도록 제안하였다.

수직보강재가 설치된 높이가 변하는 복부판에서 허용전단력은 다음과 같은 형태의 식으로 제안하였다.

$$F_v = \frac{F_y}{2.89} \left[ C_v + \frac{1 - C_v}{1.15} A \right] \quad (1)$$

여기서  $C_v = F_{cr} / F_{cy}$ 이고,  $A$ 는 다음 3가지로 나타낼 수 있다.

$$A = 1 / \sqrt{1 + (a/h_{av})^2} \quad (2)$$

$$A = 1 / \sqrt{1 + (a/h_1)^2} \quad (3)$$

$$A = \tan \phi / (1 + \beta/2) \quad (4)$$

그러나 이 방법은 복부판의 양단높이가 차가 작은 경우(복부판 양단의 높이차가 5%이내)에서 제한적으로 적용이 가능한 것으로 밝혀졌다.

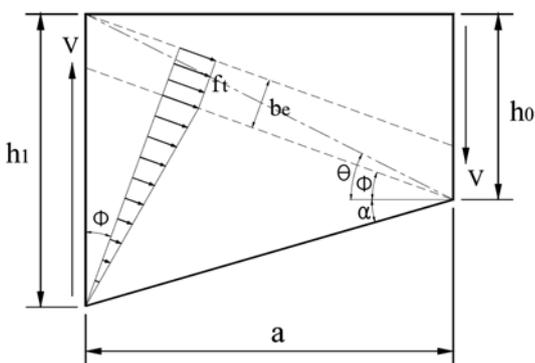


그림 2. 사인장응력분포의 가정(Falby and Lee, 1976)

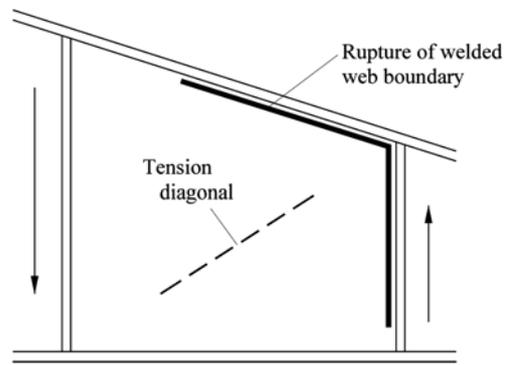


그림 3. 변단면 복부판의 파괴(Roberts and Newark, 1996)

Davis and Mandal(1979)은 Rokey(1975)의 사인장모델을 이용하여 경사진 플랜지의 축력을 반영한 이론을 제시하였으나 하중의 위치에 따라 결과가 제한적으로 적용되어진다는 단점을 갖고 있다. Roberts and Newark(1996)은 전단하중을 받는 높이가 변하는 알루미늄 플레이트거더에 관한 실험연구를 수행하였으며, 거더의 극한전단강도를 예측하기 위한 간단한 해를 개발하고자 하였다. 시험체의 파괴는 그림 3과 같이 모두 플랜지와 복부판 용접연결부에서 갑작스럽게 발생하였는데 이는 용접부의 잔류응력에 의한 강도감소로 인한 것으로 조사되었다. Roberts and Newark(1996)은 극한전단강도를 예측하기 위한 제안식에서 용접부의 잔류응력영향을 고려하였으며, 실험결과와 상관관계를 설명하였다.

최근에는 Shanmugam(2003)의 실험연구를 통해서 높이가 변하는 복부판의 사인장거동을 조사하였다. 10개의 시험체에 대한 실험과 수치해석을 통해서 변단면 복부판의 극한전단강도를 예측하기 위한 극한전단강도식을 식 (5)와 같이 제안하였으며, 높이가 변하는 복부판의 변단면변화가 복부판의 극한전단강도에 미치는 영향이 크지 않다는 결과를 발표하였다.

$$V_{ult} = V_{cr} + \frac{\sigma_y^t t_c \sin(\theta - \phi) \cdot \sin \theta}{2} - \frac{\sigma_y^t t_c c_c \sin^2 \theta}{2} + \sigma_y^t t (d \cot \theta - b + c) \sin^2 \theta + 2M_{pf} \left( \frac{1}{c_c} + \frac{1}{c_t \cos \phi} \right) \quad (5)$$

AASHTO LRFD(2004)의 하중-저항계수 설계법에서 높이가 변하는 복부판은 휨설계 규정에서는 비조밀단면으로 취급하여 응력개념으로 설계가 수행되고 있다. 그러나 강도한계상태에서 전단설계는 식 (7)과 같이 일반적인 직사각형 패널에 관련한 식으로 제시되고 있다. 높이가 변하는 복부판의 기하학적인 특성이 전혀 고려되지 못하고 있다.

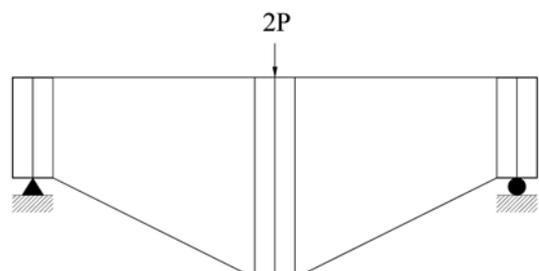


그림 4. 변단면 복부판의 실험 및 해석(Shanmugam, 2001)

$$\frac{2Dt_w}{(b_{fc}t_{fc} + b_{ft}t_{ft})} \leq 2.5 \quad (6)$$

$$V_n = V_p \left[ C + \frac{0.87(1-C)}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_0}{D}\right)^2}} \right] \quad (7)$$

$$V_p = 0.58F_{yw}Dt_w \quad (8)$$

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 유한요소모델

높이가 변하는 복부판은 그림 2나 그림 4와 같이 다양한 형태로 가정될 수 있는데, 본 연구에서는 그림 5와 같은 일반적인 강플레이트 거더 연속교에서 적용되고 있는 상부플랜지의 높이는 일정하고 하부플랜지의 높이가 변화하는 형태의 복부판 극한전단거동에 관한 모델로 한정하였다.

수치해석모델에서 플랜지의 제원은 복부판의 전단거동 시에 충분한 지지조건을 갖도록 하기 위하여 폭은 복부판 높이의 1/3, 두께는 복부판 두께의 2배 이상으로 하였다. 중간 수직보강재는 후좌굴변형 후에도 nodal line을 유지하며 단 순지지 역할을 충분히 할 수 있도록 Lee *et al.*(2002, 2003)의 연구결과를 반영하여 AASHTO규정에 6배의 강성을

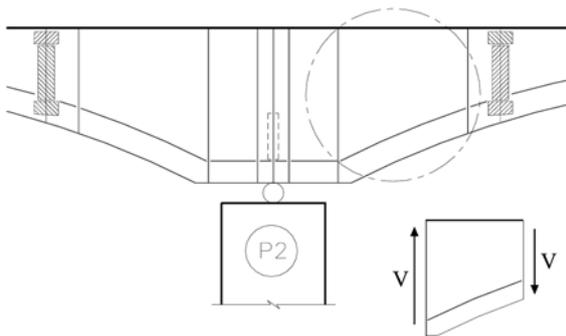
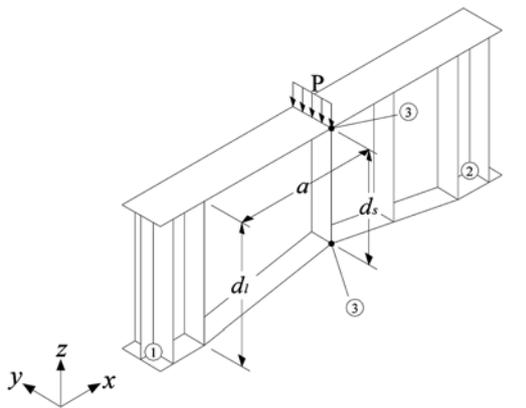
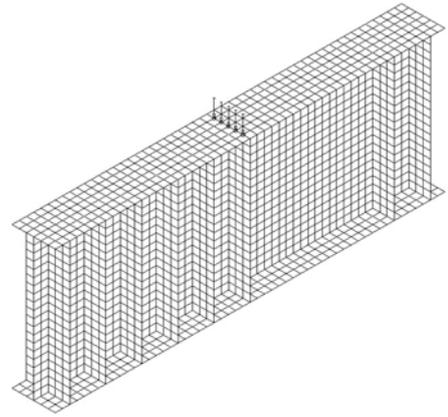


그림 5. 높이가 변하는 복부판의 적용사례

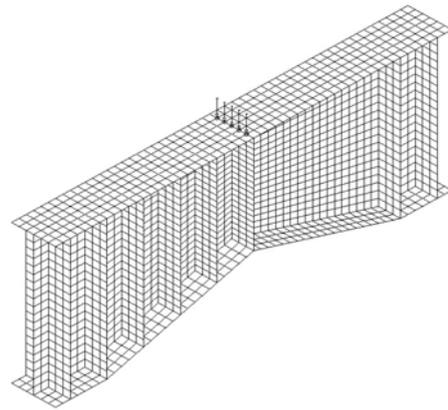


경계조건(Free:○, Fix:●)						
	X	Y	Z	$\theta_X$	$\theta_Y$	$\theta_Z$
①	●	●	●	●	○	●
②	○	●	●	●	○	●
③	○	●	○	○	○	○

그림 6. 기하학적인 제원과 경계조건



(a) 직사각형단면의 전단거더모델



(b) 높이가 변하는 복부판을 갖는 거더모델

그림 7. 유한요소모델

갖도록 설계하였다. 수치해석모델에서 경계조건은 단순보 거동을 하도록 하였으며 횡비틀 좌굴과 같은 대변위좌굴이 발생되지 않도록 상하부 플랜지를 일정간격으로 횡방향 변위를 구속시켰다(그림 6).

그림 6과 같은 해석모델의 중앙에 하중을 재하하면 단면에는 전단과 휨모멘트가 상호작용하게 된다. Standard Specifications(AASHTO, 2002)에서는 상호작용에 의해서 감소되는 전단강도를 식 (9)와 같이 규정하고 있는데, 본 연구에서는 복부판에서의 휨과 전단의 상관거동을 최소화하기 위하여 식 (9)를 고려하여 해석상에서 계산된 휨모멘트가 단면의 항복모멘트에 75%를 넘지 않도록 하였다.

$$M/M_u \geq 0.75 \text{ 이면 } V/V_u = 2.2 - 1.6(M/M_u) \quad (9)$$

그림 7과 같은 수치해석모델은 유한요소해석 프로그램인 ADINA(Ver 8.2, 2003)를 사용하였으며, 6자유도를 갖는 4절점 쉘요소(MITC4)를 이용하여 그림 5와 같은 복부판 전단상태를 갖는 단순보로 그림 7과 같이 모델링하였다. 수치해석에 앞서 요소의 수에 따른 수렴성 검토를 통해 복부판의 Mesh구성을 20×20으로 결정하였으며, 수치해석에서 적용된 강재의 물성치는 탄성계수 E=200 GPa, 강재의 항복강도는 345 MPa, 프와송비  $\mu=0.3$ 을 적용하였으며 강재의 하중-변위관계는 bilinear한 것으로 가정하였다. 복부판에서 초기변형에 의한 영향은 최소화하기 위해 Bridge Welding Code (1996)에서 제시된 기준 D/80~D/100보다 1/1000이 감소된 D/100,000을 적용하였다.

표 1. 높이가 변하는 복부판의 해석결과의 비교

세장비 ( $d_L/t_w$ )	변단면율 (식 6, %) (장변/단변)	극한전단강도								
		해석치 (①)	Farby and Lee (1976), ②		식 6.10.9.3.2-2 (AASHTO LRFD, 2004)					
			강도(kN)	①/②	장변기준 (③)		평균높이 (④)		단변기준 (⑤)	
					강도(kN)	①/③	강도(kN)	①/④	강도(kN)	①/⑤
90	10(200/180)	7,960	8,197	0.97	8,644	0.92	8,286	0.96	7,938	1.00
	20(200/160)	6,848	7,864	0.87		0.79	7,938	0.86	7,108	0.96
	30(200/140)	5,883	7,541	0.78		0.68	7,552	0.78	6,219	0.95
	40(200/120)	5,065	7,231	0.70		0.59	7,108	0.71	5,311	0.95
	50(200/100)	4,213	6,938	0.61		0.49	6,663	0.63	4,442	0.95
150	10(200/180)	3,515	4,096	0.86	4,073	0.86	3,862	0.91	3,660	0.96
	20(200/160)	3,093	3,935	0.79		0.76	3,660	0.85	3,285	0.94
	30(200/140)	2,668	3,723	0.72		0.66	3,467	0.77	2,965	0.90
	40(200/120)	2,254	3,519	0.64		0.55	3,285	0.69	2,728	0.83
	50(200/100)	1,831	3,321	0.55		0.45	2,728	0.67	2,467	0.74

3.2 매개변수 및 하중재하

높이가 변하는 복부판의 극한전단거동을 조사하기 위한 수치해석연구의 매개변수는 복부판 양단의 높이차, 세장비, 그리고 형상비를 주요변수로 결정하였다. 본 연구에서는 변단면 복부판의 장변을 기준으로 세장비 및 형상비를 구분하였다.

먼저 복부판 단면의 변화를 정량화하기 위하여 식 (10)과 같은 변단면율(tapered ratio)을 정의하였다.

$$Tapered\ Ratio(\%) = \frac{d_L - d_s}{d_L} \quad (10)$$

여기서  $d_L$ 과  $d_s$ 는 각각 복부판에서의 장변과 단변의 길이를 의미한다.

일반적으로 강거더교에서 적용되고 있는 변단면 복부판의 변화율은 최대 30% 내외로 적용되고 있으며, 해석상에서 적용된 변단면 변화율은 0~50%로 5%간격으로 하여 전단거동이 조사되었다. 복부판의 세장비는 장변을 기준으로 70~250으로 두꺼운 판에서 후좌굴강도가 큰 세장한 판까지 모두 검토되었으며, 형상비는 0.5, 1.0, 1.5까지로 변화시켰다. 수치해석 모델에서 복부판의 단면높이는 보편적인 플레이트 거더높이로 장변의 폭( $d_L$ )을 2000 mm로 하였다.

4. 해석 결과의 분석 및 검토

높이가 변하는 복부판의 수치해석결과는 복부판의 양면 중앙변과 같은 높이를 갖는 일반적인 플레이트거더 복부판의 전단강도 산정식과 비교되었다. 본 연구에서는 Lee and Yoo(1998)에서 제안된 직선복부판의 극한전단강도 산정식(부록1)을 적용하였다.

우선적으로 그림 7(b)에 대한 비선형극한해석을 통해서 AISC에서 제안한 Farby and Lee(1976)의 제안식과 비교하였으며, AASHTO LRFD(2004)에서 장변, 단변 그리고 평균높이를 기준으로한 전단강도식과 비교하였다. AASHTO규정에서는 높이가 변하는 복부판에서 형상비나 세장비를 결정하기 위한 복부판의 높이를 장변으로 해야 할지 아니면 단변으로 혹은 평균값으로 해야 할지를 제시하고 있지 않기 때문에 본 연구에서는 3가지의 경우를 각각 고려한 이론값과 해석결과를 비교하였다.

외부전단력에 대해 세장비가 각각 90과 150인 경우에서 해석결과는 단변의 길이가 감소함에 따라서 극한전단강도도

감소하는 결과가 조사되었었다. Farby and Lee(1976)에 의해서 제안된 전단강도식은 변단면율이 10%미만인 경우에서는 해석결과와 유사한 값을 나타내었으나, 장변과 단변의 길이차가 증가함에 따라서 해석결과는 강도감소가 크게 증가하는 반면에 Farby and Lee(1976)의 제안식은 상대적으로 강도감소가 크지 않은 것으로 조사되었다. 따라서 Farby and Lee(1976)의 제안식에 의한 전단강도는 해석결과와 최대 40%이상의 큰 값을 제시하여 불안정한 결과를 보이고 있다. 또한 AASHTO LRFD(2004)에서 장변이나 평균높이를 기준으로 산정된 공칭전단강도는 수치해석결과와 6.8%에서 최대 54%까지 크게 제시하고 있어 설계에 있어 불안정한 결과를 가져올 수도 있음을 표 1을 통해서 알 수 있다. 한편 단변을 기준으로 산정된 AASHTO LRFD(2004)의 전단강도는 전단면이 항복에 의해 지배되는 후판(세장비 90)의 경우에서는 단변이 먼저 항복에 도달하기 때문에 해석결과와 큰 차이를 보이지 않았지만 세장비 150과 같은 박판에서는 장변과 단변의 차가 증가함에 따라서 이론적인 값과의 차이도 증가하고 있음을 알 수 있다.

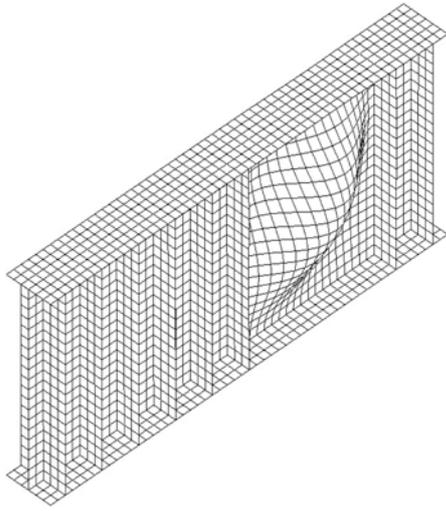
4.1 탄성좌굴강도에 관한 검토

그림 7(b)과 같은 수치해석모델에 관한 선형좌굴해석이 수행되었다. 그림 7(a)과 같은 직사각형 단면을 갖는 복부판에 대한 탄성좌굴강도를 바탕으로 변단면 복부판의 값이 상대적으로 비교되었다. 그림 8은 변단면율이 30%인 수치해석모형의 선형좌굴모드와 일반적인 직사각형 거더의 탄성좌굴모드를 나타내고 있다. 선형좌굴해석을 통해서 얻어진 Eigenvalue는 변단면율이 30%로 복부판의 높이차가 큰 경우라도 직사각형 단면과의 차이는 5%내외의 차이만을 보였다.

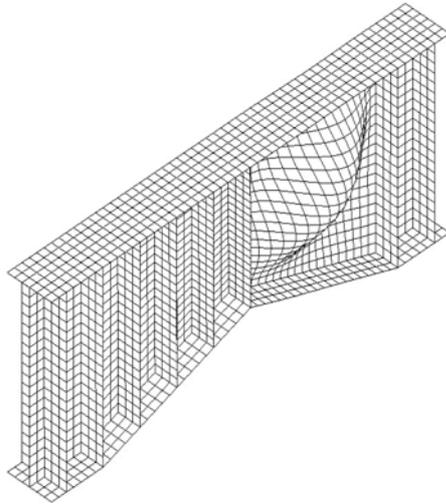
높이가 변화하는 변단면 복부판에서 형상비에 따른 탄성전단좌굴강도의 변화를 검토하였다. 유한요소 모델에서 직사각형 패널을 갖는 복부판의 탄성좌굴강도는 Lee and Yoo(1996)에서 제시한 플랜지의 강성을 고려한 전단좌굴계수를 이용한 좌굴강도와 비교되었는데, 그림 9와 같이 형상비 0.5, 1.0, 그리고 1.5 모두에서 복부판 양단의 차이변화에 따라서 전단좌굴강도의 변화는 ±5%내외로 크지 않았다.

현행 강교량 설계에서 주로 적용되는 복부판의 세장비는 90~200정도이다. 그림 9에서는다.

양한 복부판 세장비를 변수하여 해석된 탄성좌굴강도의 변



(a) 직사각형 복부판(E.V.=5.368)



(b) 변단면율 30% (E.V.=5.167)

그림 8. 선형전단좌굴형상의 비교

화를 보여주고 있는데, 다양한 세장비를 갖는 복부판도 변단면율의 영향은 나타나고 있지 않음을 알 수 있었다. 그러므로 높이가 변화하는 복부판의 탄성전단좌굴강도는 장변을 기준으로 한 직사각형 패널에서 산정된 탄성좌굴강도와 같은 값을 적용하여도 무방한 것으로 판단된다.

이 같은 결과는 기하학적인 형상에 있어서 동일한 두께에

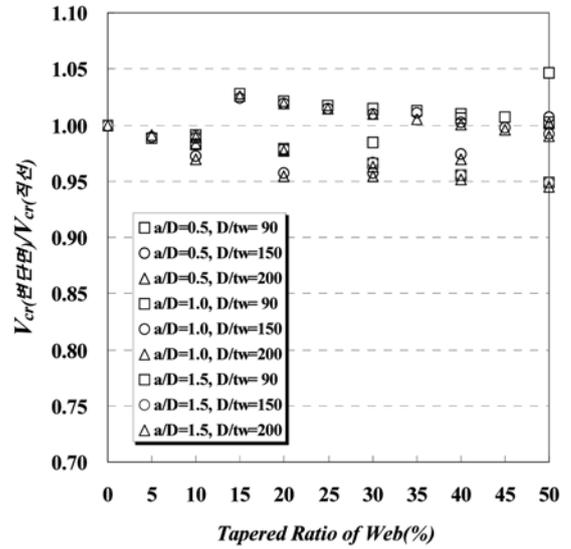


그림 9. 형상비에 따른 탄성전단좌굴강도의 비교

있어서 장변에 비하여 단변측이 상대적으로 세장비가 작아지는 결과를 나타나게 되므로, 단변측이 좌굴에 대한 강성이 증가하게 되어 상대적으로 좌굴강성이 작은 장변 측에 의해서 변단면 복부판의 전단좌굴은 지배되기 때문으로 판단된다.

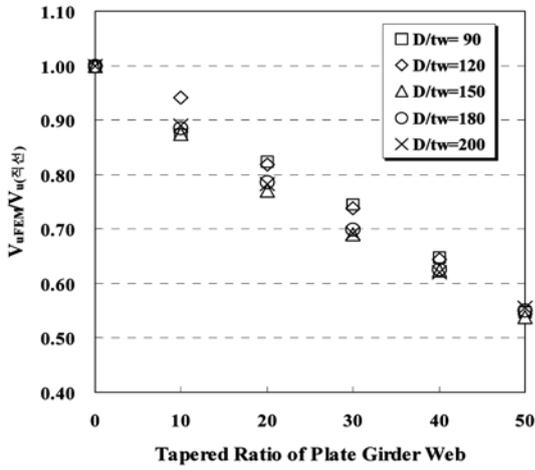
#### 4.2 극한전단거동에 관한 검토

##### 4.2.1 기하학적인 특성에 따른 검토

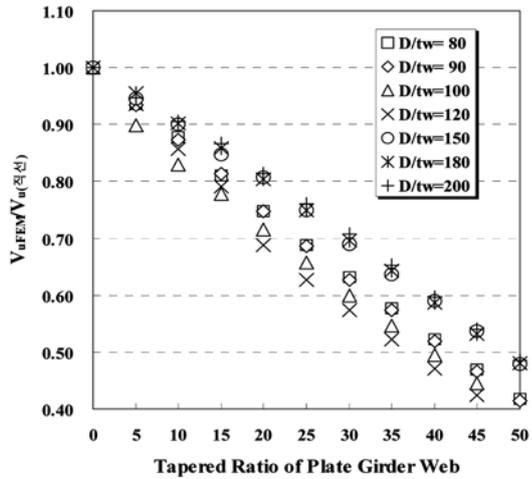
선형좌굴해석결과를 통해서 양단의 높이가 선형적으로 변화하는 복부판에서 탄성전단좌굴강도는 복부판 양단의 높이 변화에 큰 영향을 받지 않는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 비선형 유한요소해석을 통해 변단면 복부판에 관한 극한전단강도를 검토하였다. 표 2는 장변을 기준으로 한 세장비가 80과 150인 높이가 변화하는 복부판의 해석결과를 Lee & Yoo(1998)의 제안식과 비교하였다. 해석결과는 변단면율이 증가함에 따라서 극한전단강도가 모두 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. Basler(1963)는 외부하중에 의해 발생하는 휨모멘트가 공칭휨모멘트(소성 or 항복)의 75%이하에서는 플랜지가 지지하기 때문에 복부판에서 휨에 의한 전단강도의 감소는 발생하지 않는다고 밝혔다. 본 연구에서 조사된 수치해석결과도 모두 휨모멘트가 공칭휨모멘트의 75%이하이므로 변단면 복부판에서 파괴는 휨모멘트의 영향을 최소화하였다.

표 2. 높이가 변하는 복부판의 극한전단강도 비교

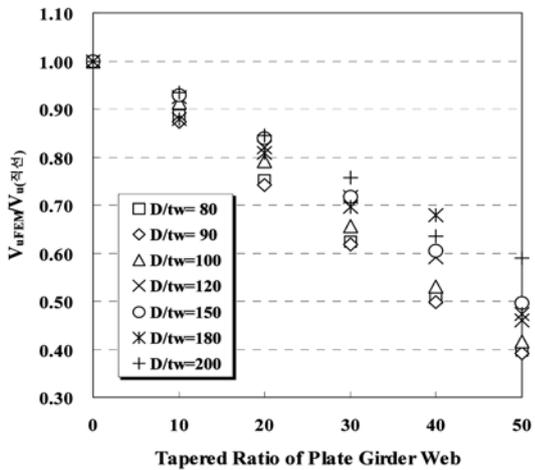
형상비 ( $a/d_L$ )	변단면율 (%)	$d_L/t_w=80$				$d_L/t_w=150$			
		FEM (kN)	Lee&Yoo (1998)	$\frac{V_{FEM}}{V_{Lee et al}}$	$\frac{M_{FEM}}{M_y}$	FEM (kN)	Lee&Yoo (1998)	$\frac{V_{FEM}}{V_{Lee et al}}$	$\frac{V_{FEM}}{M_y}$
1.0	0	10,263		1.03	0.44	3,860		1.06	0.47
	10	9,128		0.91	0.44	3,515		0.96	0.49
	20	7,918	10,005	0.79	0.44	3,093	3,648	0.85	0.49
	30	7,033		0.70	0.45	2,668		0.73	0.49
	40	6,093		0.61	0.46	2,254		0.62	0.49
	50	5,108		0.51	0.47	1,831		0.50	0.49
1.5	0	10,040		1.00	0.50	3,493		1.02	0.57
	10	9,063		0.91	0.48	3,241		0.95	0.59
	20	7,790	10,005	0.78	0.47	2,836	3,417	0.83	0.60
	30	7,053		0.70	0.49	2,460		0.72	0.61
	40	6,023		0.60	0.49	2,114		0.62	0.61
	50	5,135		0.51	0.50	1,736		0.51	0.61



(a) 형상비 0.50



(b) 형상비 1.00



(c) 형상비 1.50

그림 10. 변단면 복부판에서 극한전단강도 변화

형상비가 0.5, 1.0 그리고 1.5인 높이가 변하는 복부판에서 세장비변화에 따른 높이가 변하는 복부판의 유효요소해석결과와 직사각형 패널의 극한전단강도와와의 비를 그림 10에 나타내었다. 극한전단강도는 복부판의 변단면율이 증가함에 따라서 극한전단강도가 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 이 같은 강도감소는 형상비나 세장비의 변화와는 무관하며, 복부판 양단의 높이차에 따른 강도감소로 판단된다. 특히 복부판에서 단변의 길이가 장변에 1/2인 경우에서 극한전단강도는 AASHTO(2004)나 Lee & Yoo(1998)에서

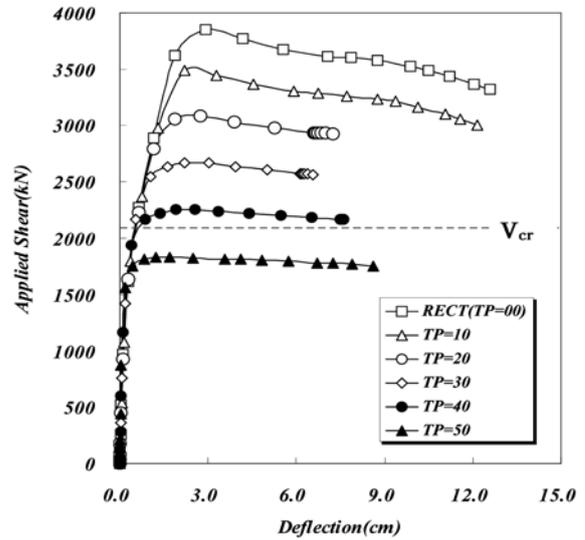


그림 11. 변단면 복부판에서 하중-변위 관계( $a/D=1.0$ ,  $D/t_w=150$ )

장변을 기준으로 계산된 직사각형 단면의 공칭전단강도에 절반까지 감소하고 있음이 조사되었다.

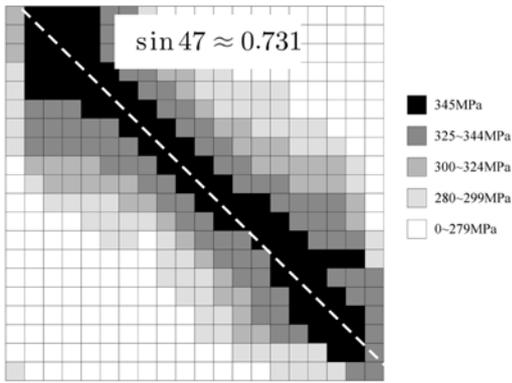
따라서 높이가 변화하는 복부판에서 AASHTO LRFD (2004)의 전단강도 산정식에 장변이나 단변을 적용하여 설계하는 것은 모두 불안전축의 설계가 될 수도 있음이 조사되었다.

#### 4.2.2 변단면 복부판의 극한전단거동

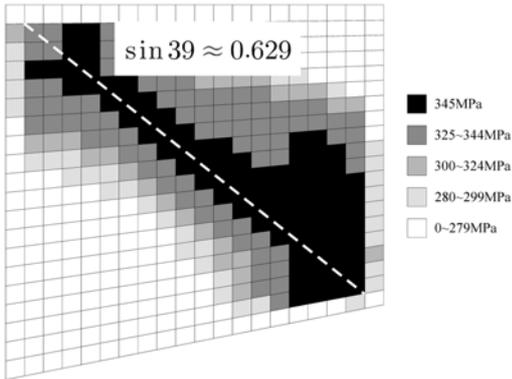
복부판에서 극한전단거동은 후좌굴이 존재하는 영역에서 탄성좌굴강도에 시인장에 의한 후좌굴거동에 따른 추가적인 강도를 더하여 산정한다. Lee & Yoo(1999)도 직사각형패널의 공칭전단강도를 탄성좌굴강도와 탄성좌굴강도 크기에 40%를 후좌굴강도로 하는 전단강도식을 제안하였다. 높이가 변하는 복부판에 관한 선형 및 비선형 극한해석을 통해서 4변이 각각 플랜지와 수직보강재에 의해서 지지된 복부판에서의 탄성전단좌굴강도는 복부판에서 폭의 변화에 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 그러나 기하학적 및 재료적 비선형을 고려한 극한해석에서는 극한강도가 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있었다.

그림 11은 후좌굴거동이 존재하는 세장비 150인 변단면 복부판에서 하중-변위관계 그래프를 나타내고 있다. 선형해석을 통해서 조사된 것과 같이 변단면율을 0에서 40%까지 변화시킨 모든 패널에서 분기점좌굴이 점선으로 표시된 동일한 위치에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 변단면율이 50%인 경우에는 극한전단강도가 탄성좌굴 강도보다 작아서 점선에 도달하지는 못했지만 하중-변위 그래프의 양상은 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 분기점 좌굴 후에 시인장 거동에 의한 후좌굴강도의 크기는 변단면율에 따라서 감소하고 있음을 그림 11에 보여주고 있다. 따라서 변단면 복부판의 변단면율에 따른 기하학적인 형상은 탄성좌굴강도에는 영향을 주지 않지만, 극한거동에 있어서 후좌굴강도의 크기를 감소시켜 높이가 변하는 복부판에서 극한전단강도가 감소되고 있음을 알 수 있다.

극한상태에서 복부판은 시인장거동에 의해 전단좌굴 후에 추가적인 강도를 발현할 수 있음을 여러 연구를 통해서 밝



(a) 직사각형 단면



(b) 변단면율 20%

그림 12. 변단면에 따른 응력분포의 비교

혀졌다. (Wagner(1931), Balser(1963)) Basler(1963)는 후좌굴강도의 크기를 식 (11)로 표현하였다.

$$V_{PB} = \frac{1}{2} \sin \phi \sigma_{ty} b_e t \quad (11)$$

여기서  $b_e$ 는 인장력장의 유효폭이며 는 인장력장의 기울기가 된다. 본 연구에서는 높이가 변화하는 복부판에서 변단면율에 따라서 후좌굴강도가 감소하는 원인을 조사하기 위해서 극한 상태에서 복부판의 항복응력 분포를 조사하였다. 그림 12 (a)와 (b)의 비교를 통해서 사인장거동에 의해 나타나는 항복 영역에 차이가 있음을 확인 할 수 있다. 일반적으로 후좌굴 강도를 결정하는

식 (11)은 사인장영역의 크기에 의해서 결정되는 데 변단면 복부판의 경우 인장력장의 기울기가 39도로 직사각형패널의 기울기 47도 보다 완만했으며 따라서 사인장영역도 상대적으로 작게 분포하고 있음을 알 수 있다. 사인장거동에 관한 조사로부터 높이가 변하는 복부판의 강도감소를 확인할 수 있었다.

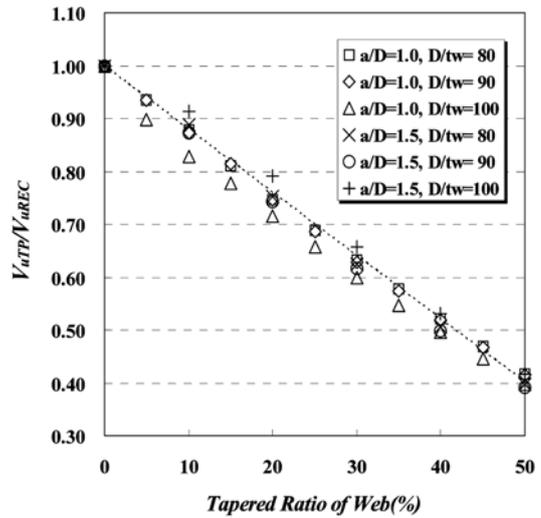
#### 4.2.3 경사진 하부플랜지의 거동

일반적인 플레이트거더에서 하부플랜지는 휨모멘트에 의해서 인장력을 받게 된다. 변단면 복부판에서 하부플랜지는 임의의 경사를 갖게 되어 트러스 구조의 사재와 같이 압축을 받게 된다. Davis and Mandal(1979)과 Shanmugam(2003)의 연구에서 경사플랜지의 영향을 고려한 전단강도식을 각각 제안하였는데, 이 같은 하부플랜지의 거동이 변단면 복부판의 전단강도에 어떠한 영향을 주는 지 검토하였다.

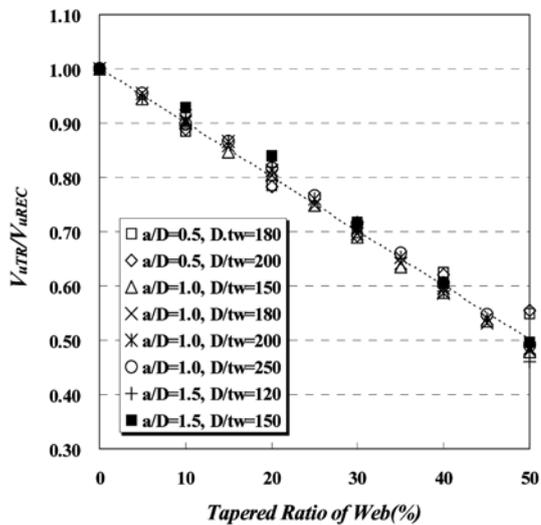
표 3은 유한요소해석결과에서 변단면율에 따른 해석모델의

표 3. 경사 하부플랜지의 축력변화

	변단면율(%)					
	0	10	20	30	40	50
$V_u$	10,190	9,310	8,132	7,025	6,055	5,070
축력	726	651	536	417	329	278
비	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05
$F_b$	101	91	74	58	46	39
$F_y$	345	345	345	345	345	345
$F_b/F_{fy}$	0.29	0.26	0.22	0.17	0.13	0.11



(a) 후 판(C>0.8)



(b) 박판(C<0.8)

그림 13. 변단면 복부판 전단강도 제안식의 유도

하부플랜지 축력과 응력의 변화를 나타내고 있다. 극한전단강도의 감소에 따라서 하부플랜지의 축력도 감소하였는데, 전단강도에 대한 축력의 비율이 일정한 것으로 나타났다. 또한 하부플랜지의 응력이 항복응력에 11%에서 29%에 불과하였다. 이러한 결과는 수직력의 분력을 플랜지에서 지지하기 때문에 전단강도의 감소가 발생하지 않는다는 기존연구(Davis and Mandal, 1979와 Shanmugam, 2003)와는 상반되는 것으로 경사 플랜지는 높이가 변하는 복부판의 극한전단강도에 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다.

### 4.3 변단면 복부판의 극한전단강도 산정식

변단면율에 따른 하중의 감소정도는 그림 13을 통해서 알 수 있다. 선형적으로 극한강도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 형상비 0.5~1.5, 세장비 80~250까지의 수치해석결과 변단면율에 따라서 선형비례의 관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 따라서 그림 13을 통해서 높이가 변하는 복부판의 극한좌굴강도를 효과적으로 감소시킬 수 있는 감소계수를 결정하였다.

$$V_{u,(Tapered)} = \mathcal{W}_{u,(Straight)} \quad (12)$$

$$\gamma = 1 - \frac{d_L - d_S}{d_L} \quad (13)$$

여기서  $V_{u,(Tapered)}$ 는 변단면 복부판의 극한전단강도,  $V_{u,(Straight)}$ 는 변단면 복부판에서 장변을 기준으로 한 직선복부판의 극한전단강도로 Lee & Yoo(1998)의 산정식(Appendix 1참고)이다.

본 연구에서 제안된 식을 고려한다면 강도한계상태에서 높이가 변하는 복부판의 공칭전단강도를 기존연구에서 제안된 복잡하고 어려운 단계를 통해서 결정되는 식이 아닌 직선패널의 공식을 이용한 간단하고 합리적인 방법으로 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

국내외적으로 제정된 허용응력설계법이나 하중-저항계수 설계법에 관한 강교량설계기준에 있어서 높이가 변하는 복부판에 관한 전단설계규정이 명확하게 제시되지 못하고 있으며, 탄성전단좌굴이나 극한전단강도에 관한 연구도 미흡한 형편이다. 본 연구에서는 변단면 복부판의 전단거동을 묘사할 유한요소모델을 선정하고 이를 선형 및 비선형 해석하여 변단면 복부판에 대한 거동을 조사하여 탄성전단좌굴강도와 극한전단강도를 합리적이고 간단하게 산정할 수 있는 방법을 제시하였다.

높이가 변하는 복부판에서 변단면의 변화율은 탄성좌굴강도에 영향을 주지 않는다는 것으로 조사되었다. 그러나 극한상태에서는 이러한 기하학적인 변화가 복부판의 후좌굴강도에 상당한 영향을 미치며, 복부판의 극한전단강도는 높이의 변화율에 따라서 선형적으로 강도가 감소하고 있음을 알 수 있었다. 변단면 복부판에서의 전단강도를 산정하기 위한 복부판의 높이, D를 장변으로 한다는 것을 제시하였으며, 또한 변단면 복부판의 효과적인 강도 산정을 위한 감소계수를 제시하였다. 따라서 본 연구를 통해 변단면 복부판의 공칭전단강도를 합리적으로 결정할 수 있음을 보였다.

### 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

건설교통부(1996) 도로교 표준시방서(부록) 하중-저항계수 설계편.  
AASHTO(2002) *Standard Specifications for Highway Bridges*,

17th ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.  
AASHTO(2004), *LRFD Bridge Design Specifications*, 3rd ed. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.  
AASHTO-AWS (2002) *Bridge Welding Code*, Joint Publication of American Associate of State Highway and Transportation Officials and American Welding Society, Inc. Washington, D.C.  
AISC(2001) *MANUAL of STEEL CONSTRUCTION-Load and Resistance Factor Design*, American Institute of Steel Construction.  
Basler, K. (1963) "Strength of plate girders in shear". *J. Struct. Div.*, ASCE, 87(ST7), pp. 151-180.  
Davis, G. and Mandal, S.N. (1979) "The collapse behavior of tapered plate girders loaded within the tip", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 672, pp. 65-80.  
Falby, W.E. and Lee, G.C. (1976) "Tension-field design of tapered Webs", *Engrg J.*, AISC, 13, pp. 11-17.  
Galambos, Theodore V. (1988) *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, 5th Ed. John Wiley & Sons, NewYork, NY.  
Lee, G.C., Morrell, M., and Ketter, R.L. (1972) "Design of Tapered Members". *Weld. Res. Counc. Bull.* No. 173, June.  
Lee, Sung, C., Davidson, J., and Yoo, C.H. (1996) "Shear Buckling Coefficients of Plate Girder Web Panels". *Computers and Structures*, Elsevier Science, Vol. 59, No. 5, pp. 789-795.  
Lee, S.C. and Yoo, C.H. (1998) "Strength of Plate Girder Web Panels under Pure Shear". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 2, pp. 184-194.  
Lee, S.C. and Yoo, C.H. (1999) "Experimental Study on Ultimate Shear Strength of Web Panels". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 8, pp. 838-846.  
Lee, S.C., Yoo, C.H., and Yoon D.Y. (2002) "Behavior of Intermediate Transverse Stiffeners Attached on Web Panels". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 3, pp. 337-345.  
Shanmugam, N.E. (2003) "Ultimate Load Behavior of Plate Girder Webs". *Steel Structures*, KSSC, Vol. 3, pp. 73-81.  
Roberts, T.M. and Newark, A.C. (1998) "Shear Strength of Tapered Aluminium Plate Girders". *Thin-Walled Structures*, Vol. 29, Nos. 1-4, pp. 47-58.  
Wagner, H. (1931) "Flat sheet metal girder with very thin metal web". Tech. Memo. 604-606, National Advisory Committee for Aeronautics (NASA).

(접수일:2005.11.9/심사일:2006.1.18/심사완료일:2006.2.27)

## 기 호

- $a, d_0$  : 중간수직보강재의 간격
- $b$  : 복부판의 폭
- $b_e$  : 시인장영역의 폭
- $b_{fc}, b_{fi}$  : 압축인장 플랜지의 폭
- $c$  : 직사각형 단면에서 플랜지에 발생하는 소성힌지의 위치
- $c_b, c_c$  : 변단면거더의 압축인장 플랜지에서 발생하는 소성힌지의 위치
- $C$  : 전단항복응력에 대한 좌굴응력의 비
- $d, D$  : 복부판의 높이
- $d_L, d_S$  : 변단면 복부판 양단에서 장변과 단변 높이
- $F_b$  : 플랜지의 응력
- $F_{fy}$  : 플랜지의 항복응력

$F_v$  : 판의 허용전단응력  
 $F_y$  : 강재의 항복강도  
 $F_{ucr}$  : 판의 전단좌굴응력  
 $F_{vy}$  : 판의 전단항복응력  
 $h_1, h_0$  : 그림 2에서 복부판의 높이  
 $h_{av}$  : 변단면복부판 양단높이의 평균  
 $k$  : 전단좌굴계수  
 $M_{FEM}$  : 해석을 통해 조사된 휨모멘트  
 $M_y$  : 단면의 항복모멘트  
 $M_{pf}$  : 플랜지의 소성모멘트  
 $t, t_w$  : 복부판의 두께  
 $t_f, t_{fi}$  : 압축인장 플랜지의 두께  
 $V_{cr}$  : 탄성전단좌굴강도  
 $V_{FEM}$  : 해석을 통해 조사된 극한전단강도  
 Lee *et al.*: Lee and Yoo(1998)의 극한전단강도  
 $V_{PB}$  : 후좌굴강도  
 $V_{ult}$  : 단면의 극한전단강도  
 $\phi$  : 사인장력장의 기울기

$$\beta : (h_1 - h_0)/a$$

부 록. 직선플레이트거더의 전단강도 산정식(Lee & Yoo, 1998)

$$V_u = V_p(0.6C + 0.4) \quad (a)$$

$$V_p = 0.58 \sigma_y D t_w \quad (b)$$

여기서  $C$ 의 값은 다음과 같이 결정된다.

$$\frac{D}{t_w} < \frac{600\sqrt{k}}{\sqrt{F_y}} \text{ 이면, } C=1 \quad (c-1)$$

$$\frac{6000\sqrt{k}}{\sqrt{F_y}} \leq \frac{D}{t_w} \leq \frac{7500\sqrt{k}}{\sqrt{F_y}} \text{ 이면, } C = \frac{6000\sqrt{k}}{\left(\frac{D}{t_w}\right)\sqrt{F_y}} \quad (c-2)$$

$$\frac{D}{t_w} > \frac{7500\sqrt{k}}{\sqrt{F_y}} \text{ 이면, } C = \frac{4.5 \times 10^7 k}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2 F_y} \quad (c-3)$$