

## 판형교에 고강도 수직보강재 적용에 관한 연구

### A Study on Application of High-Strength Vertical Stiffeners to Plate Girder

장 경 호\*                      강 재 훈\*\*                      장 갑 철\*\*\*  
Chang, Kyong-Ho              Kang, Jae-Hoon              Jang, Gab-Chul

#### Abstract

Recently, as steel structures become higher and more long-spanned, application of high-strength steels is increasing gradually. However, criteria and example for design of high-strength steel are not built up. existing criteria for structural steels is not proper for economical design of high-strength steel. Moreover, existing criteria will be decrease the fatigue performance of steel bridge using high-strength steel. Therefore, criterion for application of high-strength steel must be established.

In this paper, the behavior of plate girder using high-strength vertical stiffeners was clarified by carrying out layer elastic-plastic finite element analysis using finite deformation theory. In order to optimize the design and construction of plate girder using high-strength vertical stiffener, criterion for application of high-strength vertical stiffener is proposed.

**Keywords :** High-Strength Steel, Plate Girder, Vertical Stiffener

## 1. 서 론

최근 고강도강재의 제작기술의 발달로 인하여 고강도강을 적용한 다양한 형상의 강구조물이 건설되고 있다. 고강도강재를 적용한 강구조물은 내하력 증가 및 경량화, 고층화등으로 인한 경제적 절감효과를 기대할 수 있어 그 사용이 점차 확대되고 있다.

미국의 경우 1952년 미철강협회에서 80kgf/mm<sup>2</sup>(T-1)급 강재의 제조에 성공함으로써 고강도강의 시대를 열었다. 일본의 경우 1960년대 60kgf/mm<sup>2</sup>급 고강도강의 규정을 마련하여 실용화하였으며 1964년 花輪교에 80kgf/mm<sup>2</sup>급 고강도강재를 사용하기 시작하였다. 국내의 경우 1998년 영종대교, 방화대교, 광안대교에서 60kgf/mm<sup>2</sup>급(SM570)강재가 사용되었으며 최근 고강도강재(POSTEN60, POSTEN80)가 개발되어 적용기술 개발에 관한 연구가 진행 중이다.

이러한 고강도 강재의 적용은 점차 여러분야로

확대되고 있는 반면 고강도강 적용에 적합한 설계 예나 설계기준은 아직 확립되지 않은 상태이다. 기존의 설계기준을 고강도강에 적용할 경우 경제적인 측면에서 개선의 효과가 없을 뿐만 아니라 피로에 대해 오히려 일반강재보다 취약해질 수 있다. 그러므로 고강도강을 적용한 강구조물의 거동을 파악하고 이에 적절한 설계기준 및 시공기준을 갖추는 것이 필수적이라고 할 수 있다.

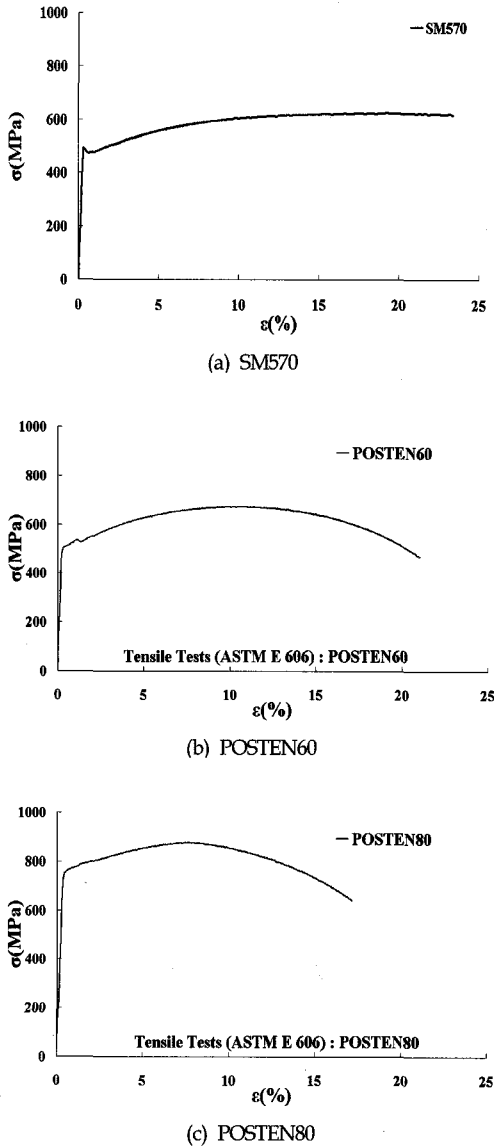
본 연구에서는 먼저 고강도강재(SM570, POSTEN60, POSTEN80)의 인장실험을 통하여 역학적 성질을 파악하였다. 실험결과와 유한변위이론을 적용한 적층판 탄소성 유한요소해석을 이용하여 고강도 수직보강재를 적용한 판형교의 해석을 수행하였다. 해석 결과를 분석하여 고강도 수직보강재의 적절한 적용 기준을 제시하였다.

## 2. 고강도강재의 인장실험 및 해석이론

### 2.1 고강도강재의 인장실험

고강도강재(SM570, POSTEN60, POSTEN80)의 응력-

\* 중앙대학교 건설환경공학과, 교수  
\*\* 정희원·중앙대학교 건축학과, 교수  
\*\*\* 중앙대학교 건설환경공학과, 박사과정



〈그림 1〉 고강도강재 인장실험 결과

변형률관계를 정확히 파악하기위해 인장실험을 수행하였다. 고강도강재 시편은 ASTM 규정을 참조하였다. 실험은 25tf용량의 MTS810 기기를 사용하

〈표 1〉 고강도강재의 역학적 특성

강종	제원			
	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$E$ (GPa)	elo (%)
SM570	550	660	206	27.8
POSTEN60	553	674	207	21.8
POSTEN80	756	875	213	17.2

였으며 재하속도는 0.1(mm/sec)속도의 변위제어방법을 이용하였다.

〈그림 1〉과 〈표 1〉은 고강도강재의 인장실험결과를 보이고 있다.

## 2.2 해석이론

본 연구에서는 고강도 수직보강재가 적용된 강교의 해석을 위해 유한변위이론을 적용한 등매개변수 적층판 쉘요소 프로그램을 이용하였다. 해석시 전단변형을 고려하여 Mindlin의 평판이론에 입각한 Refined Plate Theory<sup>1)</sup>를 이용하였다. 이때, 변위장은 식(1)과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^4 N_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} + \sum_{i=0}^4 N_i \xi \frac{t_i}{2} [V_{1i} - V_{2i}] \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $N_i$ 는 라그랑지안 형상함수이며  $V_{1i, 2i}$ 는 기준축의 단위방향 벡터이며  $\alpha_i, \beta_i$ 는 기준축의 회전각 성분이다.

소성하중 작용시 쉘구조물의 대변형 및 좌굴거동을 구현하기위해 유한변위이론<sup>2,3)</sup>을 적용하였다. 유한변위이론 정식화시 변형률-변위관계에 기하학적 비선형을 고려한 그린 변형률텐서(Green strain tensor)를 식(2)와 같이 적용하였다.

$$E_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} \cdot u_{k,j}) \quad (2)$$

$$\{d\epsilon\} = [B] \cdot \{du\} \quad (3)$$

식(3)은 그린변형률 텐서  $E_{ij}$ 를 증분형 변위-변형률 행렬  $[B]$ 로 표현한 행렬식이다.

응력-변형률관계에 있어 재료학적 비선형과 강체회전을 고려한 키르쾨프응력의 야만속도형 구성식(Jaumann's derivative of Kirchoff stress)을 식(4)와 같이 적용하였다.

$$\dot{\sigma}_{ij}^J = \dot{\sigma}_{ij}^* - w_{ik}\sigma_{kj} + w_{jk}\sigma_{ki} \quad (4)$$

$$w_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} - v_{j,i}) \quad (5)$$

여기서,  $w_{ij}$ 는 식(5)로 정의되는 회전텐서이며  $\sigma'_{ij}$ 는 야만의 속도형으로 표시되는 응력성분이다.  $\sigma^*_{ij}$ 는 시간 t에서 계산되어진 키르초프 응력성분이다. 식(4)를 증분형 응력-변형률 행렬식으로 나타내면 식(6)과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D^{ep*}] \cdot \{d\varepsilon\} \quad (6)$$

여기서,  $[D^{ep*}]$ 는 탄소성재료행렬로 탄성재료행렬  $[D^e]$ , 소성재료행렬  $[D^p]$  및 스핀텐서항을 고려한 재료행렬  $[D^*]$ 로 이루어지며 식(7)과 같이 정의된다.

$$[D^{ep*}] = [D^e] - ([D^p] + [D^*]) \quad (7)$$

적층판 탄소성 유한요소해석의 전체강성방정식을 가상일의 원리를 이용하였으며 유한변위이론에 기초한 요소강성행렬  $[K]$ 를 식(8)와 같이 정식화된다.

$$[K] = \int_V ([B]^T [D^{ep}] [B] + [G]^T [M] [G]) dV \quad (8)$$

여기서,  $[B]$ 는 식(3)에 의해 정식화된 변형률-변위 행렬이며  $[D^{ep*}]$ 는 식(7)에 의해 정식화된 응력-변형률 행렬이다.  $[M]$ 은 초기응력 행렬(Initial stress matrix)로 식(9)와 같이 정의된다.

$$[M] = \begin{Bmatrix} [\sigma_0] & 0 & 0 \\ 0 & [\sigma_0] & 0 \\ 0 & 0 & [\sigma_0] \end{Bmatrix}, [\sigma_0] = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{yz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{Bmatrix} \quad (9)$$

### 3. 고강도 수직보강재 적용에 대한 해석 및 기준식 제안

#### 3.1 해석모델

현 도로교 시방서의 수직보강재 간격에 대한 기준식<sup>4)</sup>을 검토하기 위하여 본 연구에 I-Girder와 Box-Girder를 해석모델로 선정하였다.

I-Girder모델은 그림2(a)에 보인바와 같이 40m, 복부판 높이 2.0m, 돌출폭이 양쪽으로 각각 0.3m의 합성형 플레이트 거더 모델로서 수직보강재 필요구간을 판단하여 길이방향으로 2m 간격에서 8m 간격까지 1.0m씩 증가시켜 수직보강재를 두어서 수직보강재에 따른 복부판의 영향을 알아보았다. 그리고 좌굴거동시에 가장 영향을 많이 받는 인자인 세장비에 따라 각 강종별로 100에서 600까지 각각 해석을 수행하였다. 하중은 상부플랜지 전체에 걸쳐 등분포하중을 주었으며 양단 단순지지조건으로 바닥판과의 합성작용에 의해 횡좌굴은 충분히 방지된다고 가정하여 복부판 상부에 길이방향으로 횡방향 변위를 제어하였다.

Box-Girde 모델의 형상 및 재원은 그림2(b)에 보인바와 같으며 해석시 보강재의 간격 및 하중경계 조건은 I-Girder와 동일하다.

해석모델들의 모재는 각각 Case별로 SM520, SM570, POSTEN60, POSTEN80 강재로 이루어져 있으며, 각 강재의 물성치 <표 1>의 강재실험 결과와 같다.

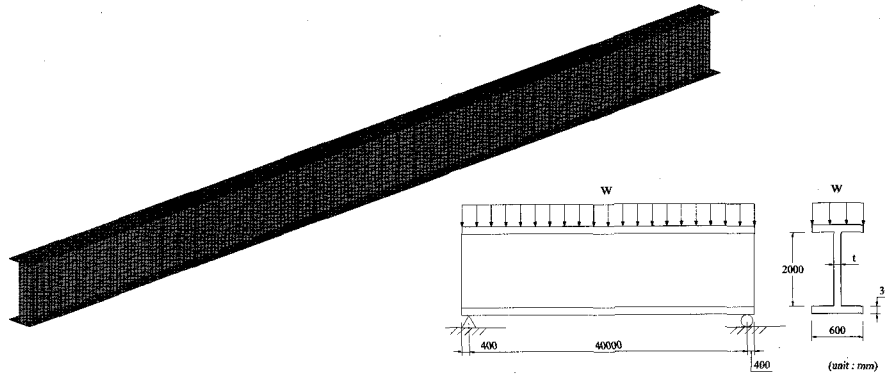
#### 3.2 기존 시방서 기준식의 판단

현재 수직보강재의 간격에 대한 도로교 시방서의 기준은 식(10)과 같다.

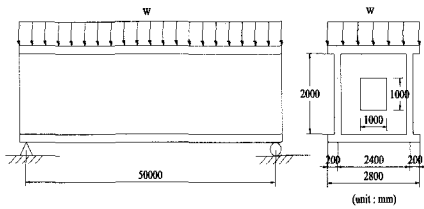
$$\begin{aligned} \frac{a}{b} > 1, & \left[ \frac{b}{100t} \right]^4 \left[ \left[ \frac{f}{3,650} \right]^2 + \left[ \frac{\nu}{810 + 610(b/a)^2} \right]^2 \right] \leq 1 \\ \frac{a}{b} \leq 1, & \left[ \frac{b}{100t} \right]^4 \left[ \left[ \frac{f}{3,650} \right]^2 + \left[ \frac{\nu}{610 + 810(b/a)^2} \right]^2 \right] \leq 1 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, a는 수직보강재의 간격(cm), b는 상하플랜지의 순간격(cm), t는 복부판의 두께(cm),  $\sigma$ 는 복부판의 압축응력(kg/cm<sup>2</sup>),  $\tau$ 는 복부판의 전단응력(kg/cm<sup>2</sup>)을 나타낸다. 단, 지점부에서는  $a/b \leq 1.5$ , 그밖에는  $a/b \leq 3.0$ 의 값을 가진다.

그림3, 4는 강종별 I-Girder 및 Box-Girder의 해석결과를 시방서 기준식에 비교한 결과로 동일한

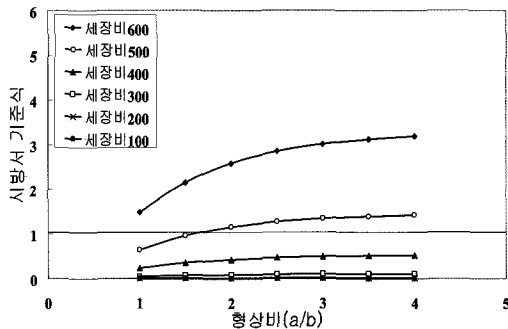


(a) I-Girder 해석모델

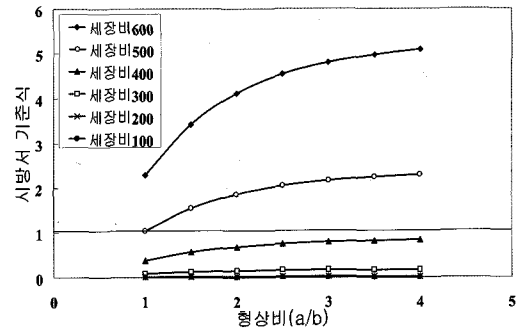


(b) Box-Girder 해석모델

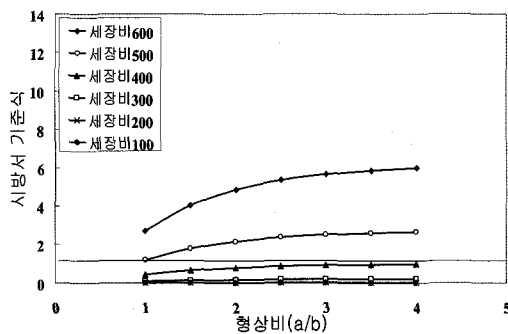
〈그림 2〉 해석모델



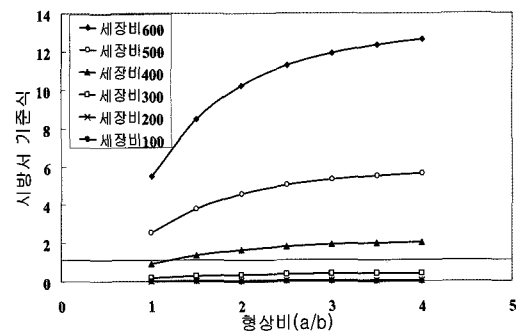
(a) SM520강재 I-Girder의 세장비별 결과



(b) SM570강재 I-Girder의 세장비별 결과



(c) POSTEN60 I-Girder의 세장비별 결과



(d) POSTEN80 I-Girder의 세장비별 결과

〈그림 3〉 I-Girder의 세장비별 해석결과

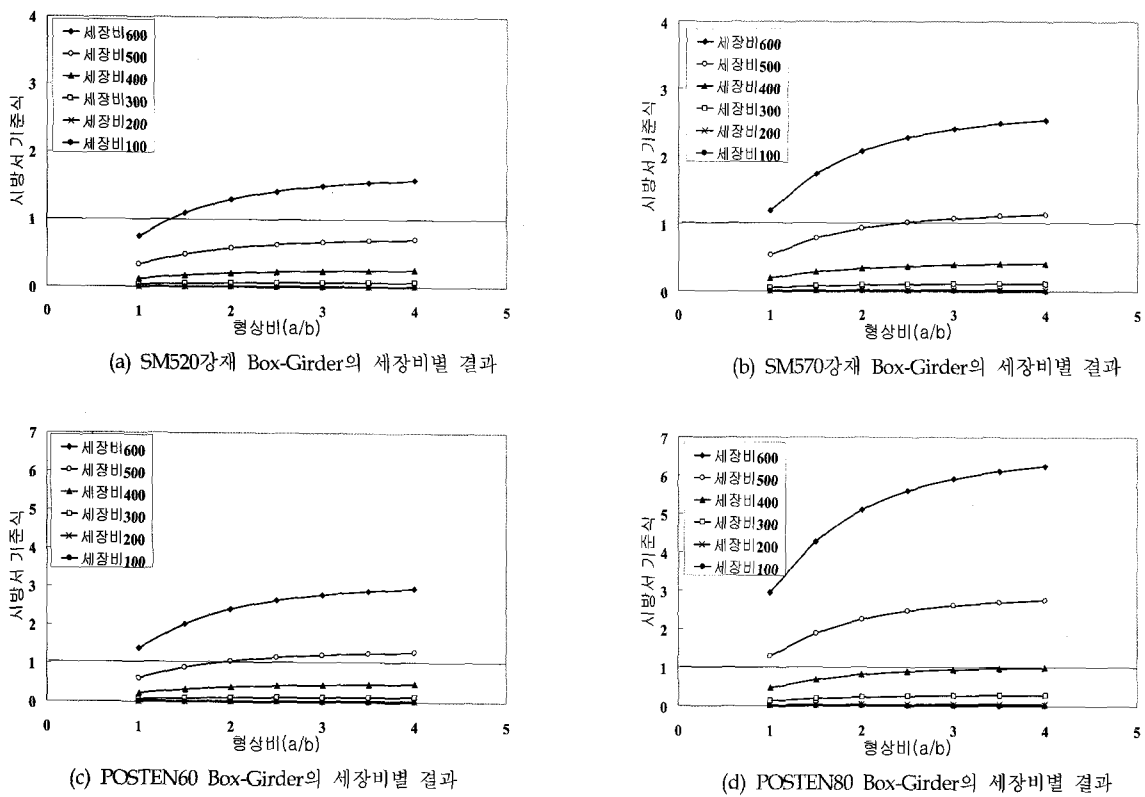
세장비에서 강재별 결과값을 비교하여 본 결과 POSTEN60강재나 POSTEN80강재에 비하여 일반 강재인 SM520이나 SM570강재가 더 안전측에 나타남으로써 오히려 고강도강재일수록 좌굴에 대하여 더 취약하다고 나타났다.

즉, 현재의 도로교 표준시방서의 수직보강재 기준식이 일반강재에 대하여는 적용하기 알맞은 식임을 알 수 있으나, 고강도강재에는 적당하지 않으므로 수직보강재의 간격에 대한 고강도강 설계기준은

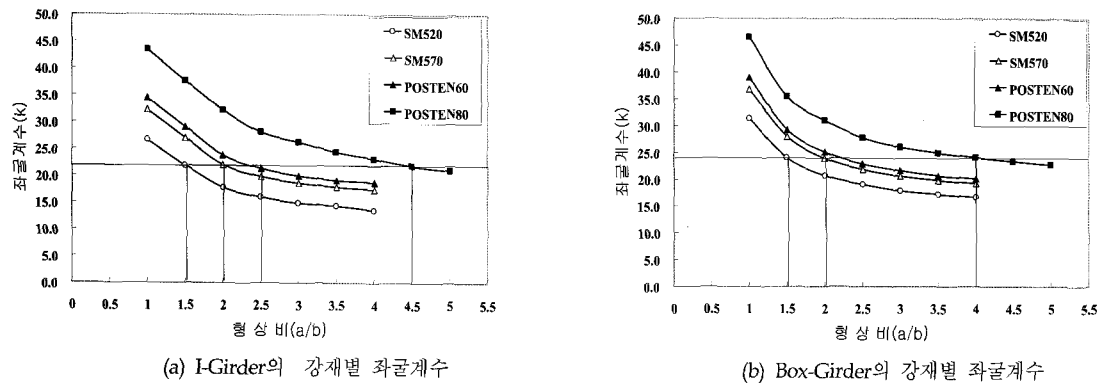
바뀌어야 한다고 사료된다.

### 3.3 수직보강재 간격에 따른 좌굴계수 산정

고강도 수직보강재의 적절한 적용을 위해 먼저 위 해석모델을 이용하여 강종별 수직보강재의 간격에 따라 좌굴계수를 해석을 통하여 산정하였다. 그 결과는 <그림 5>와 <표 2>에 보인바와 같다.



<그림 4> Box-Girder의 세장비별 해석결과



<그림 5> 해석모델의 좌굴계수

<표 2> 모델별 수직보강재 간격에 따른 좌굴계수

해석모델	강종	수직보강재 간격						
		2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m
I-Girder	SM520	26.7	21.9	17.7	16.0	14.9	14.4	13.5
	SM570	32.3	27.1	22.0	19.8	18.6	17.9	17.4
	POSTEN60	34.4	29.1	23.8	21.3	20.0	19.1	18.8
	POSTEN80	43.5	37.7	32.2	28.1	26.3	24.4	23.2
Box-Girder	SM520	31.4	24.1	20.7	19.1	17.9	17.2	16.6
	SM570	36.8	28.0	24.0	21.9	20.6	19.8	19.2
	POSTEN60	39.0	29.3	25.1	22.9	21.7	20.7	20.1
	POSTEN80	46.5	35.4	31.0	27.8	26.1	25.0	24.1

그림5(a)는 I-Girder모델의 고강도 및 일반강재 수직보강재의 간격에 따른 해석결과인 좌굴계수값을 나타내고 있다. SM520강재에서 형상비 1.5에 해당하는 좌굴계수는 21.9로서 시방서기준보다 약간 낮게 나타나지만 거의 유사하며 세장비 500에서의 값을 만족한다. 이와 같은 좌굴계수값을 갖는 SM570, POSTEN60, POSTEN80강재에서의 수직보강재 간격은 <표 2>에 보이는 바와 같이 SM570의 경우 4m까지 가능하고, POSTEN60의 경우는 5m, POSTEN80은 9m까지 가능함을 알 수 있다

Box-Girder모델의 좌굴계수값은 I-Girder모델에서의 값과 유사한 경향을 나타내고 있다. SM520강재에서 형상비 1.5에 해당하는 좌굴계수는 24.1로서 시방서기준보다 약간 크게 나타나지만 그 차이가 0.2정도로 작아 세장비 500에서의 해석에 무리가 없을 것으로 판단된다. 이와 같은 좌굴계수값을 갖는 SM570, POSTEN60, POSTEN80강재에서의 수직보강재 간격은 그림 4.11에서 보는 바와 같이 SM570과 POSTEN60의 경우는 거의 같은 형상비로서 4m, 그리고 POSTEN80은 8m까지 가능함을 알 수 있다.

위 결과로부터 고강도강재일수록 그 수직보강재 필요간격이 넓어짐을 알 수 있었다. 즉, 고강도강재를 사용할 경우 SM520강재와 같은 일반강재와 동일한 좌굴강도를 갖기 위해선 수직보강재간격을 현재의 설계기준보다 넓게 설치하여도 됨을 알 수 있다. 그러므로 판형교의 I-Girder나 Box-Girder의 경우 좌굴계수값을 이용하여 수직보강재의 간격에 대한 기준을 마련하는 것이 더 합리적이라고 사료된다.

### 3.4 고강도 수직보강재 적용 기준식 산정

<그림 5>와 <표 2>의 해석결과를 적용한 회귀분석을 통하여 <표 3>과 같은 고강도 강종별 휨 좌굴계수값과 전단 좌굴계수값을 도출하였다. 회귀분석을 통하여 도출된 좌굴계수값을 식(10)에 대입하여 I-Girder와 Box-Girder의 고강도 수직보강재 적용에 관한 기준식을 식(11)과 식(12)와 같이 제안하였다.

I-Girder 기준식 :

(SM570)

$$\left[ \frac{b}{100t} \right]^4 \left[ \left[ \frac{f}{4119} \right]^2 + \left[ \frac{v}{1095 + 1057(b/a)^2} \right]^2 \right] \leq 1$$

(POSTEN60)

$$\left[ \frac{b}{100t} \right]^4 \left[ \left[ \frac{f}{4423} \right]^2 + \left[ \frac{v}{1504 + 1232(b/a)^2} \right]^2 \right] \leq 1$$

(POSTEN80)

$$\left[ \frac{b}{100t} \right]^4 \left[ \left[ \frac{f}{5730} \right]^2 + \left[ \frac{v}{2212 + 1750(b/a)^2} \right]^2 \right] \leq 1$$

(11)

Box-Girder 기준식 :

(SM570)

$$\left[ \frac{b}{100t} \right]^4 \left[ \left[ \frac{f}{4256} \right]^2 + \left[ \frac{v}{1202 + 1099(b/a)^2} \right]^2 \right] \leq 1$$

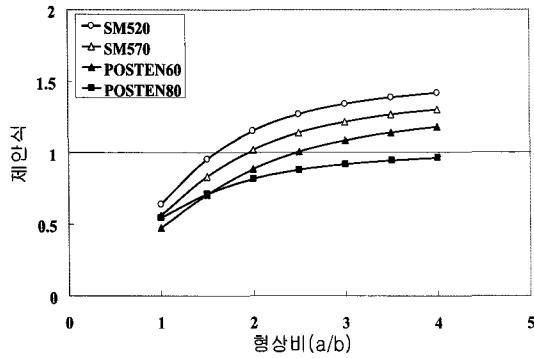
(POSTEN60)

$$\left[ \frac{b}{100t} \right]^4 \left[ \left[ \frac{f}{4454} \right]^2 + \left[ \frac{v}{1356 + 1195(b/a)^2} \right]^2 \right] \leq 1$$

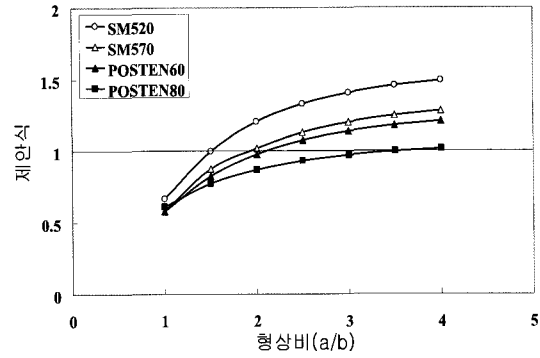
(POSTEN80)

$$\left[ \frac{b}{100t} \right]^4 \left[ \left[ \frac{f}{5380} \right]^2 + \left[ \frac{v}{2450 + 2085(b/a)^2} \right]^2 \right] \leq 1$$

(12)



(a) I-Girder의 제안 기준식의 적용



(b) Box-Girder의 제안 기준식의 적용

〈그림 6〉 제안 기준식의 타당성 검증

〈표 3〉 모델별 힘 좌굴계수 및 전단 좌굴계수

해석모델	강종	휨 좌굴계수	전단 좌굴계수	해석모델	강종	휨 좌굴계수	전단 좌굴계수
I-Girder	SM570	27.1	$7.2 + \frac{6.95}{(a/b)^2}$	Box-Girder	SM570	28.0	$7.91 + \frac{7.23}{(a/b)^2}$
	POSTEN60	29.1	$9.89 + \frac{8.10}{(a/b)^2}$		POSTEN60	29.3	$8.92 + \frac{7.86}{(a/b)^2}$
	POSTEN80	37.7	$14.55 + \frac{11.51}{(a/b)^2}$		POSTEN80	35.4	$16.12 + \frac{13.72}{(a/b)^2}$

### 3.5 제안 기준식의 타당성 검증

본 연구에서 제안한 고강도 수직보강재의 간격에 대한 기준식의 타당성을 검증하기 위해 그림2에 보이는 I-Girder와 Box-Girder 모델에 기준식에 의한 고강도 수직보강재를 적용하여 해석을 수행하였으며 그 결과는 그림6에 보인바와 같다.

I-Girder모델과 Box-Girder모델의 제안 기준식 모두 좌굴의 형상비 1에서는 그 값의 차이가 거의 없지만 형상비가 증가할수록, 즉 수직보강재 간격이 넓어질수록 고강도강이 더욱 안전치에 드는 것을 알 수 있다. 이는 수직보강재의 간격이 넓어질수록 고강도강의 적용이 유리함을 나타내는 것으로서 제안 기준식의 타당성을 입증한다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 유한변위이론을 적용한 적층판 탄소성 유한요소프그램을 이용하여 수직보강재 적용된 I-Girder 및 Box-Girder 해석을 수행하였다. 해석결과를 토대로 도로교 표준시방서에 제시된 수

직보강재의 간격에 대한 설계식을 고강도강에 적용하였을 경우 어느 정도의 합리성을 갖는지를 파악하였다. 또한 고강도강 적용 판형교의 최적 수직보강재의 간격에 대한 결정과 그에 따른 새로운 제안 기준식을 제시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 도로교 표준시방서에서 제시한 식은 판형교의 수직보강재 간격에 대한 기준으로써 동일한 세장비에서 강재별 결과값을 비교하여 본 결과 POSTEN60강재나 POSTEN80강재에 비하여 일반강재인 SM520이나 SM570강재가 더 안전측에 나타남으로써 고강도강재의 경우 적용이 불합리함을 알 수 있다.
2. I-Girder 및 Box-Girder 해석결과를 토대로 고강도 수직보강재의 간격에 대한 적합한 기준식 제안하였으며 제안된 기준식에 기초하여 고강도 수직보강재가 적용된 I-Girder 및 Box-Girder를 해석한 결과 안전치의 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 본 연구에서 제안한 기준식이 고강도 수직보강재의 적용에 타당한 기준을 제시하고 있음을 알 수 있다.

### 참고 문헌

1. J. R. Vinson, *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*, Lancaster-Basel, USA, 1999
2. Toi Y., Yuge K., Kawai T., "Basic Studies on the Crash-worthiness of Structural Elements : Part 1. Crush analysis by the finite elements method", 日本造船工學會論文集, Vol. 5. 第159号, 1986, pp.248-257
3. S. Ahmad, B. M. Irons, o. C. Zienkiewicz, "Analysis of Thick and Thin Shell Structures by Curved Finite Elements", *Int. J. Num. Meth. Engng*, Vol. 2, 1970, pp 419-451
4. 건설교통부, *도로교표준시방서*. 한국도로교통협회, 2000