

플레이트거더의 전단내력

Shear Strength of Plate Girder

최 취 경* 김 규 석**

Choi, Chui-Kyung Kim, Kyu-Suk

Abstract

In the design of plate girder web panels, it is required to evaluate accurately the elastic buckling strength under shear, whether or not the post-buckling strength is accounted for. Currently, elastic shear buckling coefficient of web panels stiffened by transverse intermediate stiffeners are determined by assuming conservatively that web panels are simply supported at the juncture between the flange and web. Although the notion of the real boundary condition at the juncture of the web and the flanges to be somewhere between simple and fixed has been recognized from early days, the boundary condition has been conservatively assumed, mainly due to lack of means to evaluate it in a rational manner. In this paper, a series of numerical analyses and experiments is carried out to provide a simple equation with some parameters especially the flange-web thickness ratio.

요 지

플레이트거더의 전단내력을 평가하기 위해서는 탄성전단좌굴강도가 정확히 산정되어야 한다. 현행 설계식에서는 탄성전단좌굴강도를 계산하기 위한 웹 플레이트의 경계조건을 4변 단순지지로 가정하고 있다. 그러나 웹과 플랜지의 경계조건은 일반적으로 단순지지가상의 구속을 가지고 있으며, 플랜지의 두께가 웹의 두께에 비해 두꺼울수록 고정에 가까워진다. 플레이트거더에서 웹 플레이트의 경계조건은 플랜지와 웹의 두께비, 스티프너의 보강간격 등에 따라 달라지게 된다. 본 연구에서는 실험과 유한요소법을 통해 플랜지와 웹의 폭비, 스티프너의 보강간격, 특히 플랜지와 웹의 두께비에 따른 웹 플레이트의 경계조건을 평가하여 플레이트거더의 전단좌굴계수를 제안하고자 한다.

Keywords : Shear buckling coefficients, Pure shear, Boundary conditions,

* 경원전문대학 건축과 교수

** 동국대학교 건축과 교수

E-mail : abc@kwc.ac.kr 011-349-8633

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2003년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

일반적으로 웹 플레이트의 폭두께비가 170(SS400) 이상 되는 경우 플레이트거더로 설계한다. 플레이트거더의 전단내력을 평가하기 위해서는 탄성전단좌굴강도가 정확히 산정되어야 한다. 현행 설계식(AISC ASD, 1989)에서는 탄성전단좌굴강도를 계산하기 위한 웹 플레이트의 경계조건을 4변 단순지지로 가정하고 있다. 그러나 웹과 플랜지에서의 경계조건은 일반적으로 단순지지이상의 구속을 가지고 있으며, 플랜지의 두께가 웹의 두께에 비해 두꺼울수록 완전구속에 가까워진다.⁽¹⁾ 플레이트거더에서 웹 플레이트의 경계조건은 플랜지와 웹의 두께비, 플랜지와 웹의 폭비, 스티프너의 보강간격등에 따라 달라지게 된다. 본 연구에서는 유한요소법과 실험을 통해 플랜지와 웹의 두께비, 플랜지와 웹의 폭비, 스티프너의 보강간격 등에 따른 플레이트거더의 탄성전단좌굴계수를 비교 분석하여 설계에 필요한 자료를 제시하고자 한다.

2. 기존의 연구

2.1 Timoshenko에 의한 탄성전단좌굴계수

플레이트거더의 탄성전단좌굴강도는 식 (1)과 같이 평가할 수 있다.

$$\tau_{cr} = k_v \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1 - \mu^2)(D/t_w)^2} \quad (1)$$

여기서,

- τ_{cr} = 탄성전단좌굴응력
- k_v = 탄성전단좌굴계수
- E = 영계수
- μ = 프와송비
- π = 원주율
- D = 웹브침
- t_w = 웹두께
- D/t_w = 웹의 세장비

위 식에서 전단좌굴계수 k_v 값은 Timoshenko⁽²⁾ 등에 의해 식(2), (3)과 같이 산정되며, 현행 AISC ASD에서는 이를 설계식에 그대로 적용하고 있다.

$$k_{ss} = 4.0 + 5.34 / (a/D)^2 \quad a/D < 1 \quad (2)$$

$$k_{ss} = 4.0 / (a/D)^2 + 5.34 \quad a/D \geq 1 \quad (3)$$

여기서,

k_{ss} = 4변단순지지인 경우의 탄성전단좌굴계수

a = 스티프너 간격

또한 AISC LRFD에서도 Timoshenko의 이론식을 바탕으로 이와 유사하게 식(4)와 같이 탄성전단좌굴계수를 평가하고 있으며, 이 값은 웹플레이트의 형상비 (a/D)에 따라 ASD설계식과 거의 같은 값을 갖는다.

$$k_{ss} = 5 + \frac{5}{(a/D)^2} \quad (4)$$

그러나 플랜지에 의해 일정량 이상 구속된 웹와의 경계조건을 4변 단순지지로 가정하는 것은 지나치게 안전측인 설계가 될 것으로 판단된다.

2.2 Bulson에 의한 탄성전단좌굴계수

Bulson⁽³⁾는 2변 단순지지와 2변 고정 경계조건을 갖는 플레이트의 전단좌굴계수 k_v 값을 식(5), (6)과 같이 평가하였다.

$$a/D < 1,$$

$$k_{sf} = \frac{5.34}{(a/D)^2} + \frac{2.31}{(a/D)} - 3.44 + 8.39(a/D) \quad (5)$$

$$a/D \geq 1,$$

$$k_{sf} = 8.98 + 5.61 / (a/D)^2 - 1.99 / (a/D)^3 \quad (6)$$

여기서,

k_{sf} = 2변고정-2변단순지지인 경우 탄성전단좌굴 계수

2.3 형상비에 따른 탄성전단좌굴계수 비교

Table 1은 Timoshenko와 Bulson에 의한 탄성전단좌굴계수를 웨브플레이트의 형상비에 따라 비교한 것이다. Table 1을 통해 웨브 플레이트의 형상비가 증가할수록 전단좌굴계수 k_v 값이 크게 차이나고 있음을 알 수 있다.

3. 유한요소해석

3.1 요소분할

적정 요소분할을 결정하기 위해 순수전단을 받는 1m×1m의 정사각형 플레이트의 해석을 먼저 수행하였다. 요소분할은 4×4, 8×8, 16×16, 50×50 으로 분할하여 해석을 수행하였다. 플레이트의 경계조건은 4변 단순지지와 2변고정-2변단순지지인 두 가지 경우를 고려하였다. Fig. 1은 요소망에 따른 해석결과를 이론식과 비교하여 나타낸 것이다. 해석결과 25×25로 요소를 분할한 경우 오차는 1%이내로 나타나 충분히 신뢰할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 1 형상비에 따른 탄성전단좌굴계수 비교

경계조건	웨브 플레이트의 형상비(a/D)					
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Timoshenko	25.36	9.34	7.12	6.34	5.98	5.78
Bulson	26.74	12.60	10.88	10.13	9.75	9.53

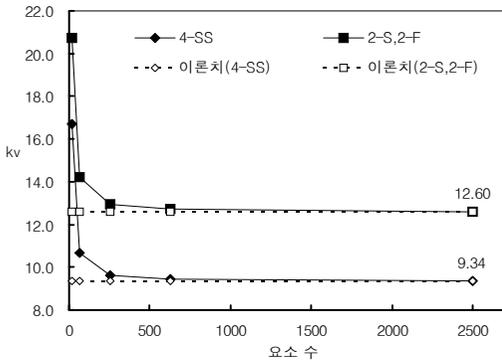


Fig. 1 요소망에 따른 k_v 값 비교

3.2 해석모델

Fig. 2는 일반적인 플레이트거더의 형상을 나타낸 것이며 Fig. 3은 해석을 위해 이상화한 해석모델을 나타낸 것이다. 보강 스티프너에 의한 웨브플레이트의 구성은 단순지지로 가정하였으며, 해석에 사용된 경계조건은 웨브플레이트에 순수전단이 발생할 수 있도록 Table 2와 같이 적용하였다. 해석에 사용된 모델의 단면형상 및 기계적 특성은 Table 3과 같으며, 웨브와 플랜지의 두께비(t_f/t_w), 웨브플레이트의 형상비(a/D), 웨브플레이트의 폭두께비(D/t_w), 웨브와 플랜지의 폭비(B/D)를 주요변수로 하여 해석을 수행하였다.



Fig. 2 플레이트거더 해석모델

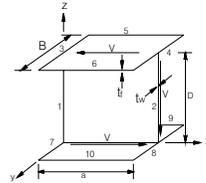


Fig. 3 플레이트거더 웨브패널의 경계조건

Table 2 플레이트거더 해석모델의 경계조건

변	x	y	z	θ_x	θ_y	θ_z
1	1	1	1	1	1	0
2	0	1	0	1	1	0
3 7	1	1	1	1	0	1
4 8	0	1	0	1	0	1

주) 0 : 자유 1 : 구속

Table 3 해석모델의 단면형상 및 기계적특성

웨브 춤(D)	웨브 두께(t_w)	탄성계수(E)	프와송비
60cm	0.32cm	210000kg/cm ²	0.3

3.3 해석결과 및 분석

본 연구에서는 해석결과를 선형회귀 분석하여 식 (7), (8)과 같이 전단좌굴계수를 평가하였다.

$0.5 < t_f / t_w \leq 3.0$ 인 경우,

$$k_v = 0.4(k_{sf} - k_{ss})\left(\frac{t_f}{t_w}\right) + \frac{1}{5}(6k_{ss} - k_{sf}) \quad (7)$$

$t_f / t_w > 3$ 인 경우,

$$k_v = k_{sf} \quad (8)$$

Fig. 4는 형상비(a/D)가 1인 경우 웨브의 폭두께비(D/t_w)에 따른 해석결과를 제안식과 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 4를 통해 웨브의 폭두께비는 탄성전단좌굴 계수에 전혀 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

Fig. 5는 웨브플레이트의 형상비(a/D)를 주요 변수로 하여 해석한 결과를 제안식과 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 4와 Fig. 5를 통해 전단좌굴계수 k_v 값은 제안식과 잘 일치되고 있으며, 플랜지와 웨브두께(t_f / t_w)가 증가함에 따라 전단좌굴계수는 4변단순지지에서 2변단순지지-2변고정의 경계조건으로 전환되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 $t_w/D=200$, $a/D=1.5$ 인 해석모델의 좌굴모드를 플랜지와 웨브의 두께비에 따라 나타낸 것이다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 플랜지와 웨브의 두께비 t_f / t_w 의 값이 증가함에 따라 플랜지의 구속효과가 증가하고 있으며, t_f / t_w 가 3.0이상인 경우 플랜지에 의한 웨브의 경계조건이 완전고정의 효과를 지니게 된다.

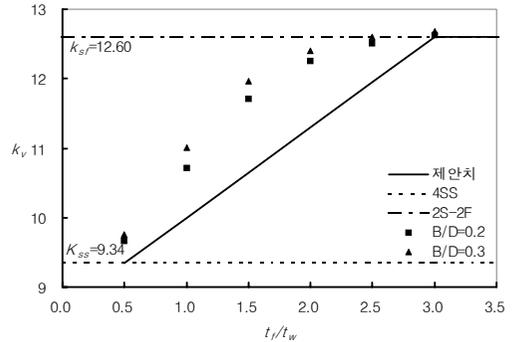
4. 실험

4.1 실험계획

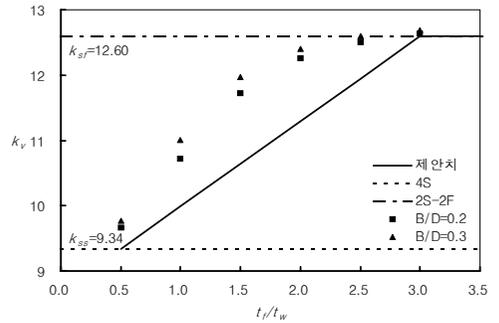
4.1.1 가력계획

순수전단을 받는 플레이트거더의 실험은 현실적으로

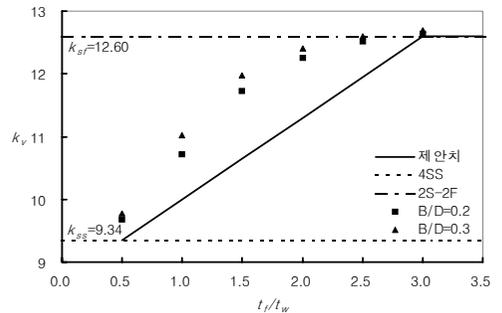
불가능하며 다소의 휨이 존재하는 경우에도 플레이트 거더의 전단내력에는 큰 영향을 주지 못한다.⁽⁵⁾ 따라서, 본 연구에서는 플레이트거더의 전단내력을 평가하기 위해 Fig. 7과 같이 단조가력하여 플레이트 거더의 전단내력을 평가하였다.



(a) $D/t_w=170$ 인 해석모델

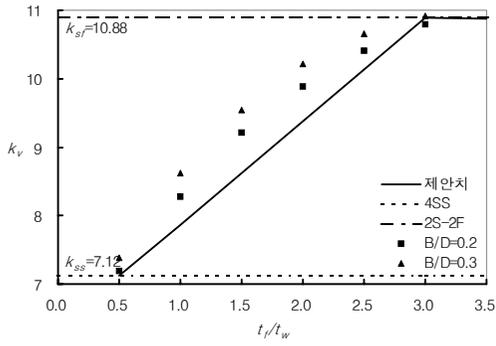


(b) $D/t_w=200$ 인 해석모델

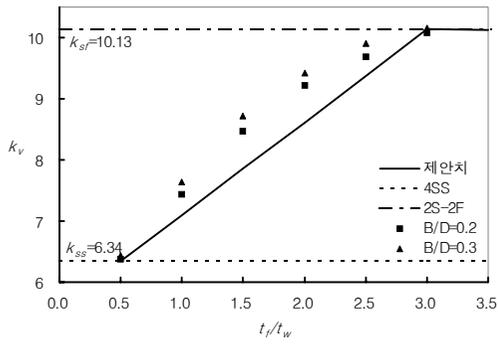


(c) $D/t_w=250$ 인 해석모델

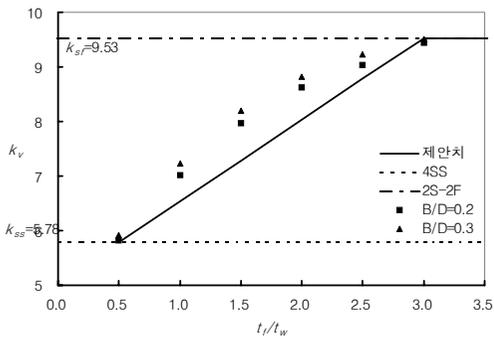
Fig. 4 웨브 폭두께비에 따른 탄성전단좌굴계수 ($a/D=1$)



(a) $a/D=1.5$ 인 해석모델

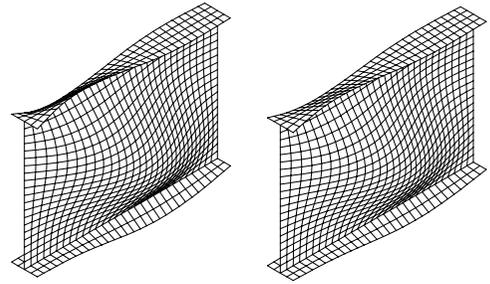


(b) $a/D=2.0$ 인 해석모델



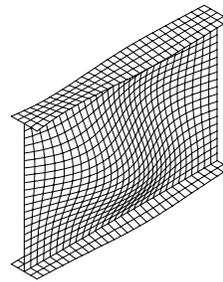
(c) $a/D=3$ 인 해석모델

Fig. 5 형상비에 따른 탄성전단좌굴계수 ($t_w/D=170$)

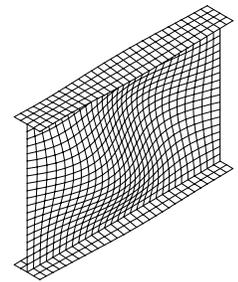


(a) $t_f/t_w=0.5$

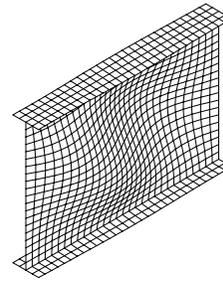
(b) $t_f/t_w=1.0$



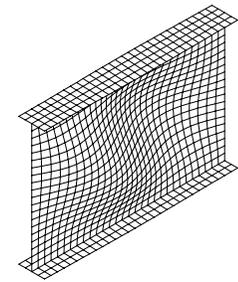
(c) $t_f/t_w=1.5$



(d) $t_f/t_w=2.0$



(e) $t_f/t_w=2.5$



(f) $t_f/t_w=3.0$

Fig. 6 플랜지와 웨브의 두께비에 따른 좌굴모드

($D/t_w=200, a/D=1.5$)

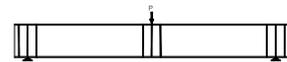


Fig. 7 실험체 가력계획

4.1.2 실험체 계획

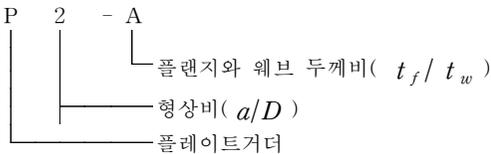
유한요소해석결과 플레이트거더의 전단내력에 가장 큰 영향을 주는 요소는 웨브플레이트의 형상비(a/D)와 플랜지 웨브의 두께비 (t_f/t_w)다.

본 연구에서는 형상비와 플랜지 웨브의 두께비를 주요변수로 실험체를 계획하였으며, 플랜지와 웨브의 폭비는 휨에 의한 전단내력감소와 횡좌굴의 방지를 위해 1/3으로 결정하였다. Table 4는 실험체 계획을 나타낸 것이다.

Table 4 실험체 계획

실험체명	D	B	a	t_w	t_f	t_f/t_w	실험체 길이
P2-A	600	200	1200	3.2	6	1.87	3100
P2-B	600	200	1200	3.2	9	2.81	3100
P2-C	600	200	1200	3.2	10	3.12	3100
P3-A	600	200	1800	3.2	6	1.87	4300
P3-B	600	200	1800	3.2	9	2.81	4300
P3-C	600	200	1800	3.2	10	3.12	4300

주) 실험체명



4.2 실험결과

4.2.1 소재시험결과

본 실험에 사용된 H형강의 기계적 성질을 파악하기 위해 실험체 제작에 사용된 형강의 웨브와 플랜지 두께별로 3개의 인장시험편을 KS B 0801 에 따라 제작하여 소재시험을 실시하였으며 시험결과(평균값)는 Table 5와 같다.

Table 5 소재시험 결과

	σ_{y2} (tf/cm ²)	σ_{u2} (tf/cm ²)	σ_y/σ_u	E (kgf/cm ²)	연신율 (%)
플랜지	3.21	4.3	0.74	2.02×10^6	35
웨브	3.12	4.1	0.76	1.98×10^6	35

4.2.2 실험체의 하중변위곡선

Fig. 8과 9는 각각 P2, P3시리즈 실험체의 하중변위곡선을 정리하여 나타낸 것이다.

Fig. 8을 통해 웨브플레이트의 형상비가 2인 경우 플랜지 웨브의 두께비에 따라 전단내력의 차이가 커짐을 알 수 있으나 Fig. 9의 형상비가 3인 경우 플랜지 두께의 증가에 따른 내력차이는 미소함을 알 수 있다. Photo 1은 실험체의 파괴형상을 나타낸 것이다.

Photo1을 통해 플랜지 웨브의 두께비가 작은 경우 플랜지가 웨브의 회전을 구속하지 못하지만 플랜지 웨브의 두께비가 큰 경우 두 부재의 경계조건이 고정에 가까워짐을 알 수 있다.

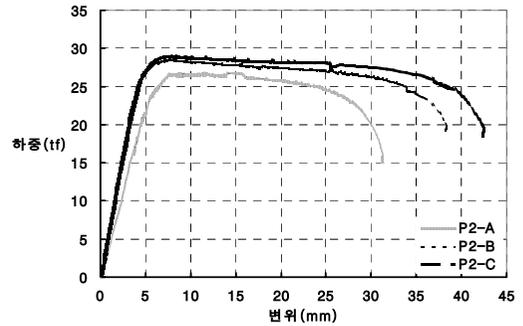


Fig. 8 P2 시리즈 실험체의 하중변위곡선

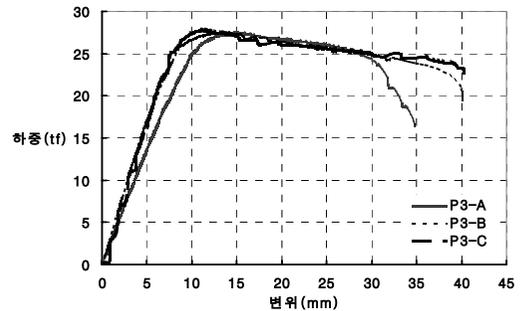


Fig. 9 P3 시리즈 실험체의 하중변위곡선

4.3 실험결과 분석

Table 6은 실험결과 및 현행설계식 그리고 본 연구의 제안식에 의한 플레이트거더의 전단내력을 비교하여 나타낸 것이다.



(a) P2-A



(b) P2-B

Photo 1 실험체의 파괴형상

Table 6 탄성전단강도 비교

실험체명	실험값(t)	실험값/제안식	실험값/설계식
P2-A	10.31	1.14	1.51
P2-B	12.28	1.22	1.80
P2-C	12.76	1.17	1.87
P3-A	11.09	1.32	1.78
P3-B	11.26	1.19	1.81
P3-C	12.56	1.23	2.02

Table 6을 통해 실험값과 제안된 평가식이 잘 일치하고 있으며, 현행 설계식이 과도하게 안전측으로 평가되고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 탄성전단좌굴 계수에 가장 크게 영향을 주는 것은 웹플레이트의 형상비(a/D)와 플랜지 웨브의 두께비(t_f/t_w)비라는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

5. 결 론

순수전단을 받는 플레이트거더의 전단좌굴계수 k_v 값을 유한요소해석 및 실험을 통해 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 플랜지 웨브의 두께비 t_f/t_w 가 증가함에 따라 전단좌굴계수는 4변단순지지에서 2변단순지지-2변고정의 경계조건으로 전환되며, 웹플레이트의 형상비(a/D)가 작은 경우에는 보강스티프너의 구속효과도 단순지지 이상으로 나타났다.
- 2) 웨브와 플랜지의 두께비(t_f/t_w)가 3.0이상되는 경우 플랜지에 의한 웨브의 구속은 완전고정조건에 도달하는 것으로 나타났다.
- 3) 본 연구에서는 해석결과와 실험결과를 선형회귀분석하여 다음과 같이 전단좌굴계수를 평가하였으며, 해석 및 실험에 대한 결과와 잘 일치 하는 것으로 판단된다.

$0.5 < t_f/t_w \leq 3.0$ 인 경우,

$$k_v = 0.4(k_{sf} - k_{ss})\left(\frac{t_f}{t_w}\right) + \frac{1}{5}(6k_{ss} - k_{sf})$$

$t_f/t_w \geq 3$ 인 경우,

$$k_v = k_{sf}$$

감사의 글

본 연구는 대명건설주식회사의 연구지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다

참고문헌

1. S. C. Lee, J. S. Davidson & C. H. Yoo, Shear Buckling Coefficients of Plate Girder Web Panels, Computers & Structures Vol. 59, No. 5, pp. 789-795, 1996.

-
2. S. P. Timoshenko and J. M. Gere, Theory of Elastic Stability, 2nd Edn. McGraw-Hill, New York (1961).
 3. P. S. Bulson, Stability of Flat plates. Elsevier, New York (1970).
 4. ADINA User Interface Primer, ADINA R&D Inc. August.
 5. Charles G. Salmon & John E. Johnson, Steel Structures Design and behavior, Haper collins.
 6. K. Basler and B. Thurlimann, Plate girder research. In:Proc. AISC National Engineering Conf. New York(1959).
 7. K. Basler, New provisions for plate girder design. In:Proc AISC National Engineering Conf. New York pp65-74 (1961).
 8. K. Basler, Strength of plate girder in shear. Trans. ASCE 128, 683-719 (1963).
 9. ADINA User Interface Command Reference Manual. Vol. 1: ADINA Model Definition, ADINA R&D Inc. May.
 10. Timoshenko, S.. Theory of Elastic Stabilit, 1963.

(접수일자 : 2003년 1월 13일)