



상시하중상태에서 박벽의 보강효과에 대한 연구

Reinforcing Effect of Thin-wall at Serviceability Condition

김두환* · 윤성수**† · 박진선*

Kim, Doo Hwan* · Yoon, Seong Soo**† · Park, Jin Seon*

ABSTRACT

For the reasonable analysis of design problems for agricultural facilities, considered the reinforcing effect of thin-wall. The most of agricultural structure is constructed small scale and have many purposes. Thus it has been designed temporary rather than permanent structure, and has relatively large slenderness ratio, small section and semi-rigid condition. Therefore many agricultural facilities are consist of relatively strong frame with weak wall at the viewpoint of stiffness and have not been reflected in the design. But the tension field influences to collapse of structure have already known. Therefore, we need quantification the effect of tension field at structural analysis. In this study, present the method of quantification the effect of tension field that came out thin-plate surrounded by high stiffness frame. The numerical results show that the effect of tension field effect for thin-wall is about 5% of the sectional area of frame in study agricultural facilities.

Keywords: Tension field, FEM, Thin-wall, Service load

I. 서 론

많은 농업시설물들은 소규모로 제작되고, 다양한 용도로 사용되고 있다. 따라서 영구적 구조물로 제작되기 보다는 짧은 재현빈도를 갖도록 설계되며 이에 따라 비교적 세장비가 크고, 단면이 작으며, 반강절점구조를 갖게 된다. 유리온실에 사용되는 경량 골조나 장막 벽체는 그 대표적인 예이다. 이 시설물들은 상대적으로 강한 골조와 낮은 강성의 벽체로 구성되어 있어, 설계에서 벽체에 대한 고려 없이 골조에 대한 해석만 실시하나 낮은 강성의 벽체에도 사인장력장(tension field)이 발생함이 알려져 있다.

패널형태의 복부 판은 주로 전단력에 저항을 하게 되며, 이 전단력에 저항하는 복부 판은 경사방향 (45°)으로 압축이 발생하면서 전단좌굴이 발생하고, 이와 직각방향으로 인장력이 발생하게 된다. 여기서, 인장력은 마치 트러스의 사재와 같은 역할을 하면서 전단좌굴이 발생한 복부 판일지라도 추가적인 전

단력에 더 저항할 수 있다 (post-buckling strength).

전단을 받는 복부 판이 탄성좌굴을 일으킨 후에도 추가적인 전단력에 저항한다는 사실을 Wilson (1886)이 처음 발견하였고, Wagner (1931)에 의해서 체계화된 사인장력장 이론이 제안된 후, 벽체에 대한 체계적인 이론과 연구가 진행되고 있지만 농업시설물과 같은 소규모 시설물에 대한 구조해석에서 벽체와 같은 역할을 하는 패널부분에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 상대적으로 강한 골조로 둘러싸인 얇은 판에 발생하는 사인장력장의 효과를 정량화하고, 이를 상사할 수 있는 방안을 제안한다. 또한 농업시설물을 대상으로 강한골조에 둘러싸인 판구조물과 같은 변위를 갖게 하는 골조의 강성에 대한 상사, 판을 저항체로 가정하여 감소되는 힘 하중으로의 상사, 그리고 가세 (bracing)의 상사를 가정하였으며, 유한요소해석법을 사용하여 평가하였다.

II. 박벽 보강효과의 기본이론

1. 사인장력장

판형 복부판의 사인장이론은 Wagner (1931)가 최초로 발표하였다. 그 후 많은 연구가 이루어졌는데 그 대표적으로는 Basler (1959)에 의해 이루어졌다. 순수전단이 작용하는 복부판이 탄성좌굴을 일으킨 후에도 추가되는 전단력에 저항하게 되는데,

* 충북대학교 대학원

** 충북대학교 농업생명환경대학

† Corresponding author. Tel.: +82-43-261-2575

Fax: +82-43-271-5922

E-mail address: yss@cbnu.ac.kr

2009년 1월 7일 투고

2010년 2월 4일 심사완료

2010년 2월 19일 게재확정

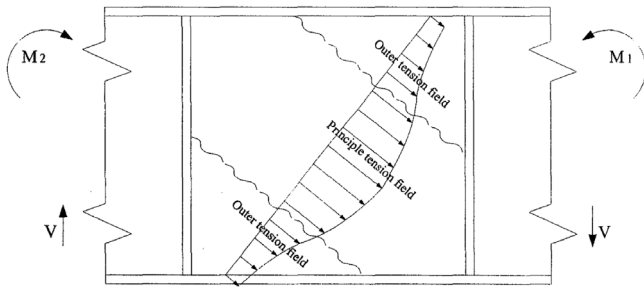


Fig. 1 Tension field action

이후 응력재분배가 일어나고 후좌굴이 발생하여 복부판이 대각선으로 접히면서 사인장력장 (Fig. 1)을 이루어 추가적인 하중을 지지하게 된다 (Basler, 1963).

2. 복부판의 후좌굴거동

가. Basler 극한전단강도

Basler는 극한전단력을 산정하는 과정에서 복부판에 전단력이 작용하여 사인장력이 발생할 때 플랜지는 수직 방향으로 비교적 유연하여 사인장력장으로 인한 응력에는 저항할 수 없다고 보았고, 그 대신 수직보강재가 사인장력장에 대하여 앵커와 같은 역할을 한다고 보았다. 결과적으로 플랜지와 접한 부근의 복부 단면적은 유효하지 않고, Fig. 2와 같은 플랫폼 트리스와 같은 하중전달 메커니즘을 갖는다고 볼 수 있다. 따라서 플랜지는 트리스의 현재와 같은 역할을 하고, 수직보강재는 수직재의 역할을 하며 사인장력장은 사재의 역할을 한다고 볼 수 있다.

복부판의 탄성좌굴이후에도 사인장 거동을 통하여 추가적인 전단하중에 저항할 수 있는데 이를 후좌굴강도라 한다.

판의 사인장력장에서 파괴되기 이전 최대 전단하중은 앞에서 언급되었던 바와 같이 부재의 지지조건에 의해 결정된다. 극한

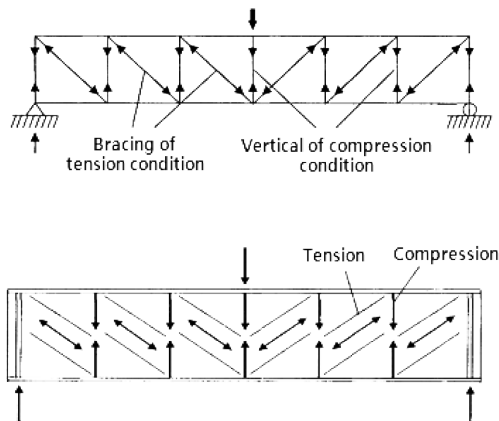


Fig. 2 Load path mechanism of pratt truss structure

전단력은 다음과 같은 형태로 Basler에 의해 제안되었다.

$$V_u = \tau_{cr} b t + \frac{1}{2} \sin \phi \sigma_{ty} b_e t \quad (1)$$

V_u : Ultimate shear force

τ_{cr} : Elasticity buckling Stress

σ_{ty} : Diagonal tensile Stress

b : Width

t : Thickness

ϕ : Angle of diagonal member

b_e : Effective width

나. Rockey의 면내좌굴

Basler (1963)는 플랜지의 휨강성을 고려하지 않은 반면 Rockey와 Porter 등 (1978)은 플랜지와 접한 부분에서도 사인장력장 (diagonal tension stress)이 발생한다고 보았다. 이와 같은 사인장력의 작용으로 플랜지에 휨모멘트가 발생하고, 이 때문에 압축측과 인장측 플랜지에 소성힌지가 형성되어 sway collapse 메커니즘으로 파괴된다고 가정하였다. Rockey 등 (1978)은 복부판의 하중이 증가함에 따라 탄성좌굴거동, 후좌굴거동, 그리고 파괴거동 등으로 나타난다고 가정을 하였다. 탄성좌굴의 발생 전까지는 Fig. 3(a)에서처럼 판형 복부판에는 균등한 크기의 전단응력이 플랜지의 45° 방향으로 주인장응력이 발생하고, 그와 직교하는 135° 방향으로는 압축주응력이 발

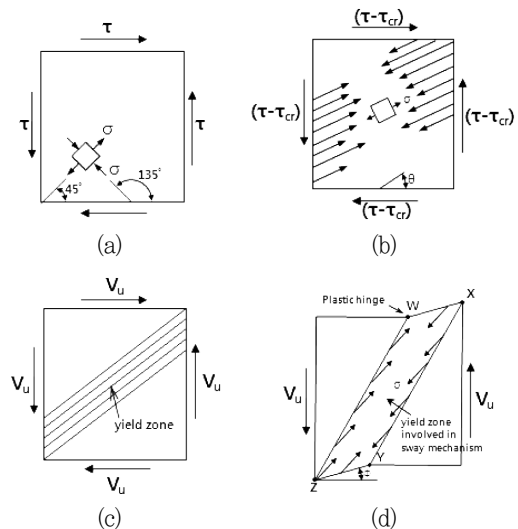


Fig. 3 Failure mechanism of plate with shear force (a) Behavior of pre-buckling (b) Behavior of post-buckling (c) Failure mechanism by Basler (d) Failure mechanism by Porter

생하게 된다. 이 상태에서 전단력이 점차 증가하면 복부판의 전단응력이 탄성좌굴응력 (τ_{cr})에 도달하게 되고, 그 부재는 좌굴이 발생한다.

두 번째 단계는 후좌굴 상태로 전단응력이 탄성좌굴응력 (τ_{cr})을 넘으면 압축방향으로는 더 이상의 저항을 할 수 없게 되고 Fig. 3(b)와 같이 밑변을 θ 의 각을 이루는 방향으로 발생하는 사인장력장 (σ_i)에 의해서만 추가 전단력을 지지하게 된다. 이러한 사인장력장응력의 작용 하에서는, 플랜지는 안으로 구부러지게 되며 인장력장의 범위와 경사는 플랜지의 경사에 의해 크게 영향을 받는다.

마지막 단계는 극한전단력을 받는 상태로 좌굴응력 (τ_{cr})에 사인장력장 (σ_i)이 더해져 복부판이 항복이 되는 단계이다. 복부판이 항복할 때 판형의 최종파괴는 상하 플랜지에 소성힌지가 생기게 되면서 Fig. 3(c), (d)에서 보는 바와 같이 WXYZ의 항복영역이 형성될 때 일어난다. 파괴강도는 이러한 3단계 메커니즘을 고려하여 복부판의 파괴상태에서 판형에서의 가상 sway 변위를 적용시킴으로써 구한다.

III. 복부판 사인장력의 평가

본 연구에서 사인장력장의 수치적 정량화를 위해 Fig. 4와 같은 두 구조물에서 박판대신 가새를 사용하여 두 구조물의 변위 값 (u, u')이 일치하는 결정 인자를 찾아 범용 구조해석 프로그램인 SAP2000TM을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다.

1. 박벽에 작용하는 사인장력의 정식화

Fig. 4에서와 같이 변위를 결정짓는 인자 중 frame-plate 구조물의 강성행렬을 나타내는 K 와 frame-bracing 구조물의 K' 이 같아지면 두 구조물의 변위 값이 같아진다고 가정한다. 만약, 식 (2)와 같은 조건은 식 (3)로 표현할 수 있다.

$$[K] = [K'] \Rightarrow u = u' \tag{2}$$

$$[K]_{frame+plate} = [K']_{frame+bracing} \Rightarrow u = u' \Rightarrow$$

$$u = u' \Rightarrow [K]_{frame+plate} \neq [K']_{frame+bracing} \tag{3}$$

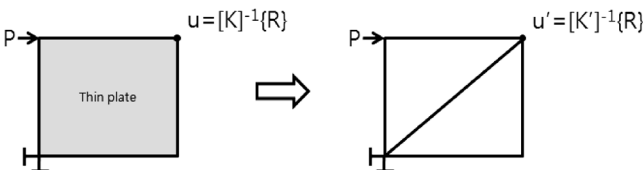


Fig. 4 Frame-plate structure and frame-bracing structure

그러나 변위 값 u, u' 이 같다고 변위 값의 결정인자인 K 와 K' 이 같은 것은 아니다. 여기서, frame과 bracing의 재료특성인 탄성계수 (E)와 포아송비 (ν)가 같다는 가정 하에 frame-bracing 구조물에서 변위 값을 결정짓는 인자 ($[K]_{bracing}$)을 구하기 위해 단면적 (A)과 단면2차모멘트 (I)를 단면결정인자로 보고 다음과 같은 함수를 설정한다.

$$A = f(x_i) \tag{4}$$

$$I = g(x_i)$$

$f(x_i), g(x_i)$: x_i 에 따른 유사함수

따라서 x 에 따른 함수 $f(x_i), g(x_i)$ 를 결정하는 문제로 정리되며, 이를 유한요소해석을 이용한 구조해석을 통해 결정한다. 이때, 함수 $f(x_i), g(x_i)$ 를 계수로 가정한다면 frame-plate 구조물의 해석을 frame-bracing 구조물 즉, 오직 frame 구조물로 해석이 가능하며 이를 이용해 신뢰성 해석과 설계에 반영할 수 있다.

2. 연구방법

본 연구의 방법으로는 frame-plate 구조물과 frame만 있을 때 구조물의 형상비 (L/H) 및 frame의 단면 증가율에 따른 변위를 비교하여 plate요소에서 사인장력장이 작용하는 것을 구명하고, plate요소를 bracing요소로 대체하였을 때의 동일한 변위 값을 찾아 사인장력장의 수치적 정량화를 하는 것이다.

유한요소 범용해석프로그램인 SAP2000TM을 이용해 수치해석을 하여 구조물의 형상비와 frame의 단면증가율에 따른 frame-plate 구조물의 변위 값(u)을 구하고, 이를 기준 값으로 정하였다. 또한, frame-bracing 구조물은 SAP2000TM을 통해 bracing의 단면을 일정한 크기로 변화시켜 구조물의 형상

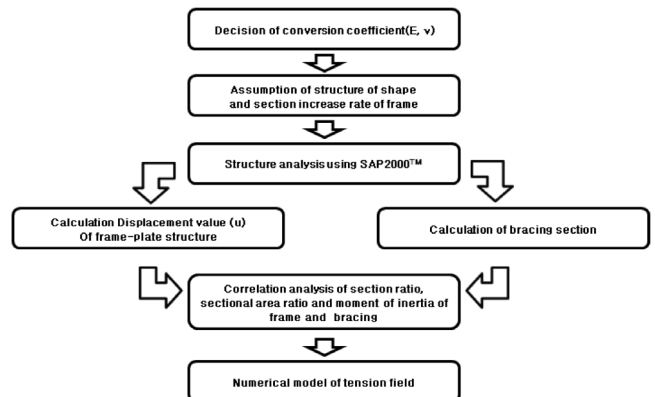


Fig. 5 Work flow of this study

Table 1 Modulus of elasticity and Poisson's ratio of frame and plate

	Frame	Plate
Modulus of elasticity (E)	2.10×10^5 MPa	3.51×10^5 MPa
Poisson's ratio (ν)	0.30	0.38

비와 frame의 단면증가율에 따라 구하여진 참 값과 동일한 변위 값을 갖는 bracing의 단면을 구할 수 있었다. 이렇게 구하여진 bracing의 단면을 통해 frame과 bracing의 단면비, 단면적비, 단면2차모멘트비를 다중회귀분석을 통하여 상관관계를 분석하고, 사인장력장의 수치적 모델을 제시한다.

3. 분석 재료 및 제원

프로그램의 실행에 앞서 본 연구에서 사용된 재료들은 표준화된 농업용 비닐하우스에 쓰이는 frame 요소의 강관과 plate 요소의 폴리염화비닐의 재료특성을 프로그램에 사용하였다. 강관과 폴리염화비닐의 제원은 Table 1과 같다.

Frame요소인 강재의 형상은 파이프이며 직경 (D)은 31.7 mm, 두께 (t)는 1.8 mm이며, plate요소인 폴리염화비닐의 두께는 0.22 mm로 하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 변환계수의 결정

가. Frame-plate 구조물과 frame 구조물

앞에서 가정한 구조물의 변위 값은 형상비에 영향을 받을 것이라고 가정하고 형상비에 따른 frame-plate 구조물과 frame 구조물의 변위 값을 구하여 서로 비교한 후 plate요소에 사인장력장이 발생한다는 것을 확인하였다.

구조물의 총 윤변의 길이는 1,800 mm로 하고 가로 (L)와 세로 (H)를 조정하여 Table 2와 같은 형상비를 가정하고 두 구조물의 변위 값을 구하였다.

나. Frame-plate 구조물과 frame-bracing 구조물

plate를 bracing으로 대체한 구조물은 앞에서 가정한 frame-plate 구조물과 frame 구조물의 형상 비에 frame의 직경 (D)와 두께 (t)를 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %로 증가하여 plate가 포함된 구조물과 bracing로 대체하였을 때의 구조물의 변위 값이 일치하는 bracing의 단면적을 구하였다. frame의 증가된 단면의 제원은 Table 3과 같다.

2. 구조물에 발생한 변위의 비교

Table 2 Shape ratio of structure

L (mm)	H (mm)	L/H
540	1260	0.43
630	1170	0.54
720	1080	0.67
810	990	0.82
900	900	1.00
990	810	1.22
1080	720	1.50
1170	630	1.86
1260	540	2.33

Table 3 Section increase rate of frame

Section increase rate	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
D (mm)	31.70	39.63	47.55	55.48	63.40
t (mm)	1.80	2.25	2.70	3.15	3.60

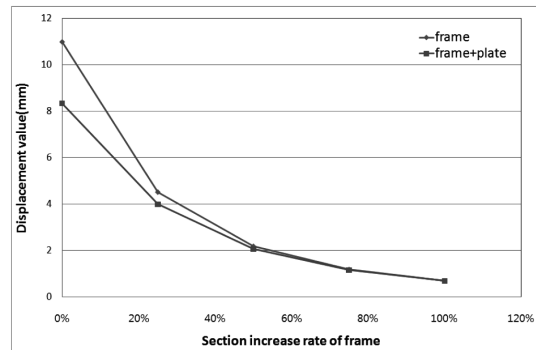


Fig. 6 Comparison of displacement value to section increase rate

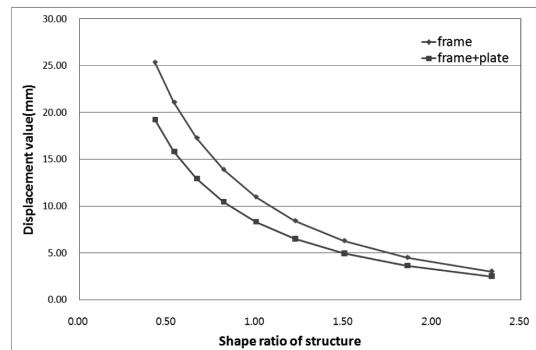


Fig. 7 Comparison of displacement value to shape ratio of structure

가. Frame-plate 구조물과 frame 구조물의 변위 비교
plate요소에 사인장력장이 작용하는 것을 확인하기 위해 frame만으로 된 구조물과 frame-plate로 된 구조물의 변위 값을 단

Table 4 Comparison of displacement according to increase rate of section

Increase ratio	Frame (u) (mm)	Frame-plate (u') (mm)	u' / u
0 %	10.98	8.33	0.76
25 %	4.52	3.99	0.88
50 %	2.19	2.06	0.94
75 %	1.19	1.15	0.97
100 %	0.70	0.69	0.99

Table 5 Comparison of displacement according to shape ratio of structure

Shape ratio	Fame (u) (mm)	Frame-plate (u') (mm)	u' / u
0.43	25.37	19.25	0.76
0.54	21.08	15.84	0.75
0.67	17.27	12.94	0.75
0.82	13.92	10.45	0.75
1.00	10.98	8.33	0.76
1.22	8.45	6.50	0.77
1.50	6.30	4.95	0.79
1.86	4.51	3.63	0.80
2.33	3.06	2.54	0.83

면 증가율에 따라 Table 4와 같이 정리 하였고, 구조물의 형상비에 따라 Table 5와 같이 정리하였다. Fig. 6은 frame의 단면 증가율에 따른 frame 구조물과 frame-plate 구조물의 변위 값을 나타낸 그림이고, Fig. 7은 구조물의 형상비에 따른 frame 구조물과 frame-plate 구조물의 변위 값을 나타낸 그림이다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 단면 증가율과 구조물의 형상비의 증가에 따라 변위 값의 차이는 줄어들지만 사인장력장에 의한 차이가 남을 볼 수 있다.

나. Frame-plate 구조물과 frame-bracing 구조물의 변위

Frame-plate 구조물과 frame-bracing 구조물의 형상비와 단면증가율에 대해서 동일한 변위 값을 찾고 구조물의 형상비에 따라서 각각의 변환계수 들에 대해서 변위 값을 구하였다. Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 단면비, 단면적비, 단면2차모멘트비를 나타낸 그림이다.

그리고, frame의 단면증가율에 따른 구조물의 형상비와 frame과 bracing의 단면비, 단면적비, 단면2차모멘트비로 정리 하였다. Fig. 11은 frame과 bracing의 단면비, Fig. 12는 단면적비, Fig. 13은 단면2차모멘트비별로 나타낸 그림이다.

구조해석 결과를 이용하여 회귀분석을 한 결과 Fig. 14와 같이 구조물의 형상비에 따른 frame과 bracing의 단면비의 결과

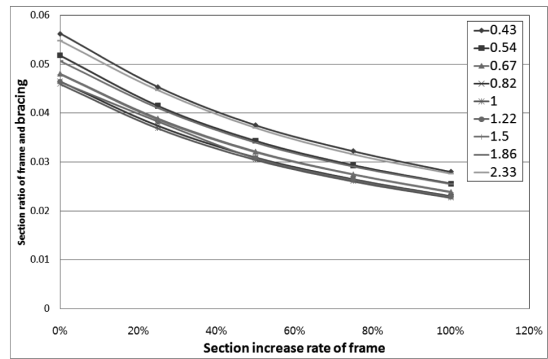


Fig. 8 Section ratio of frame and bracing and section increase rate of frame to shape ratio of structure

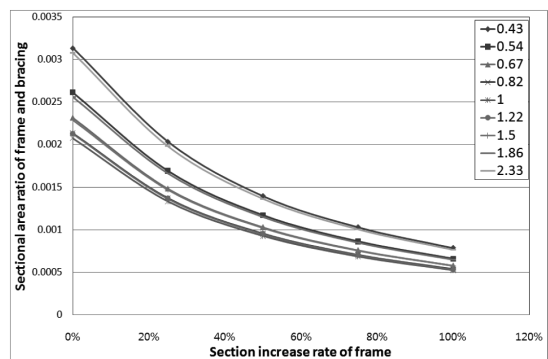


Fig. 9 Sectional area ratio of frame and bracing and section increase rate of frame to shape ratio of structure

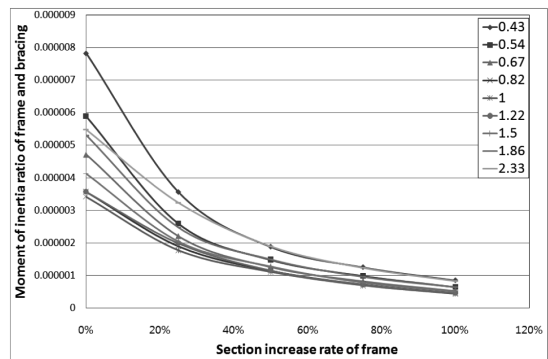


Fig. 10 Moment of inertia ratio of frame and bracing and section increase rate of frame to shape ratio of structure

값이 단면적비와 단면2차모멘트비의 결과 값 보다 실제 frame-plate 구조물의 변위 값을 추정하는데 매우 유사한 값을 구할 수 있는 식 (5)를 구할 수 있었다.

$$u = -0.009x^3 + 0.0467x^2 - 0.0696x + 0.00774 \quad (5)$$

$$(R^2 = 0.9725)$$

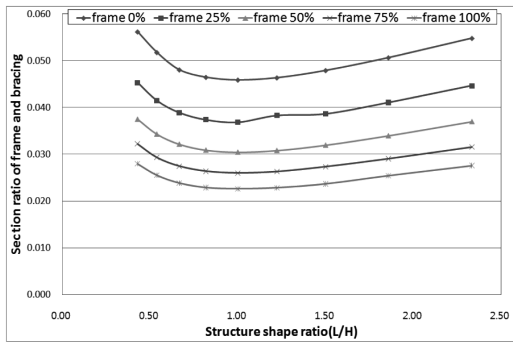


Fig. 11 Structure shape ratio and section ratio of frame and bracing to section increase rate of frame

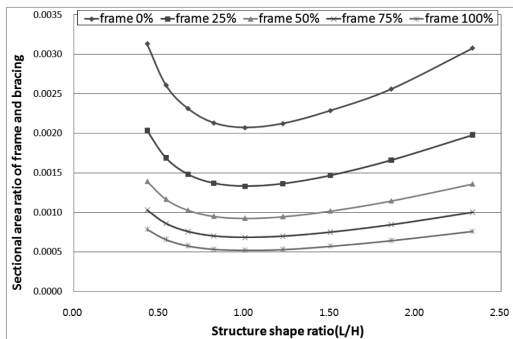


Fig. 12 Frame structure shape ratio and sectional area ratio of frame and bracing to section increase rate of frame

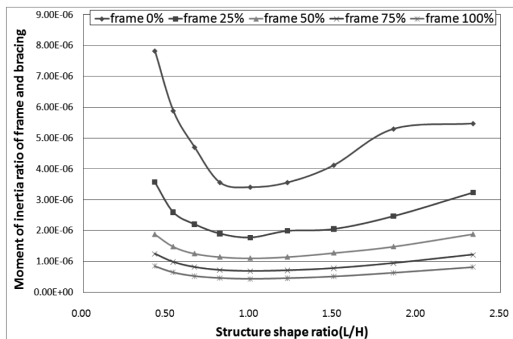


Fig. 13 Frame structure shape ratio and moment of inertia ratio of frame and bracing to section increase rate of frame

where, $x = \frac{\text{width of structure}}{\text{height of structure}}$

Fig. 14는 frame 단면증가율과 구조물의 형상비에 따른 frame 과 bracing의 단면비를 표면형태의 3차원 그래프로 나타낸 그림이며, 구조물의 형상비와 frame 단면증가율을 변수로 하여 구한 추정식은 식 (6)과 같다.

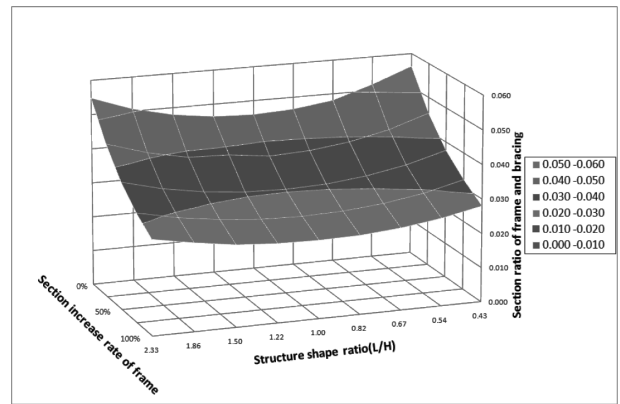


Fig. 14 Structure shape ratio and section ratio of frame and bracing to section increase rate of frame (3D-surface)

$$u = -0.0247\alpha + 0.0008378\beta + 0.07137 \quad (6)$$

$$(R^2 = 0.876)$$

where, α : Section increase rate of frame
 β : Structure shape ratio

V. 요약 및 결론

강한 골조로 둘러싸인 판에 발생하는 사인장력장의 효과를 상사를 통해 수치적으로 정량화하였다.

본 연구는 사인장력장의 수치적 모델을 제시하기 위해 먼저 변환계수를 결정하였고, 구조물의 형상 및 frame의 단면증가율을 가정하여 프로그램을 통해 구조해석을 하였고, frame-plate로 된 구조물의 변위 값과 bracing의 단면을 산출하였다. frame과 bracing의 단면비, 단면적비, 단면2차모멘트비의 상관분석을 통해 수치적 모델을 제시하였으면 최종적으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Frame-plate 구조물과 plate가 없는 frame만으로 된 구조물의 변위 값의 차이에서 볼 수 있듯이 plate 요소에 사인장력장으로 인해 구조물의 안정성이 증가되며, frame-plate로 이루어진 구조물 설계시 사인장력장이 작용하는 plate 요소를 설계에 고려될 수 있다.
2. Frame-plate로 된 구조물과 frame-bracing로 된 구조물의 동일한 변위 값을 구한 결과 bracing의 단면은 frame의 단면에 4~6 %일 때 비교된 두 구조물의 변위 값이 같아졌다.
3. 구조물의 형상비에 따라서 frame과 bracing의 단면비, 단면적비, 단면2차모멘트비를 상관분석 한 결과 단면비에 따른 결정계수가 가장 유의한 값으로 나왔고, 수치모델을 작성하였다.
4. 연구를 통해 구한 frame 단면증가율과 구조물의 형상비에 따른 frame과 bracing의 단면비에서 frame 단면증가율과 구조

물의 형상비를 변수로 하여 회귀분석을 하였으며, 이를 통한 수치모델을 구성하였다.

앞으로 사인장력장이 작용되는 2차원적 요소인 plate대신 1차원적 요소인 bracing으로 대체하여 수치해석을 하면 보다 쉽게 신뢰성 해석과 설계에 반영할 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 농업시설물의 설계에 반영한다면 기존에 보급된 설계 기준보다 구조적으로 더 안전하고 경제적인 설계가 이루어질 것이며 보다 쉽게 농업시설물의 규격화 및 표준화가 이루어질 것이라고 판단된다.

REFERENCES

1. AASHO, 1973. *Standard specifications for highway bridges*, 11th ed., American Association of State Highway Officials, Washington DC.
2. AISC, 1997. *Seismic provisions for structural steel buildings*, AISC, Chicago.
3. AISC, 1999. Load and resistance factor design specification, AISC, Chicago.
4. Besler, K., 1963. Strength of plate girders in shear, *Transactions of the ASCE* 128(2): 683-719.
5. Chung, L., H. S. Park, Kim, & J. S. Kim, 1991. Similitude law of reinforced concrete structures subjected to dynamic loading, *The Architectural Institute of Korea* 11(2): 541-546.
6. Kim, N. S., J. H. Lee, and S. P. Chang, 2004. An equivalent multi-phase similitude law for pseudodynamic test on small-scale RC models, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea* 7(6): 101-108.
7. Lee, M. H., S. H. Oh, M. H. Yoon, and T. S. Moon, 2006. Structural behaviors of steel-plate shear panels due to aspect ratios and stiffener-reinforced types (I) monotonous loading test, *Journal of Korean Society of Steel Construction* 22(5): 129-136.
8. Lee, S. C., D. Y. Yoon, and U. Y. Jeong, 2003. Experimental study on the ultimate behavior of steel box girder webs, *Korean Society of Civil Engineers* 23(6): 1295-1302.
9. Park, H. G., J. H. Kwack, S. W. Jeon, and W. K. Kim, 2007. Structural capacity of steel plate walls according to various infill plate details, *Journal of Korean Society of Steel Construction* 19(1): 1-67.
10. Park, H. S., J. G. Min, and L. Chung, 1992. Modeling techniques of reinforced concrete members based on the similitude requirements, *The Architectural Institute of Korea* 8(1): 191-198.
11. Shin, D. G. 1998. Postbuckling behavior of rectangular plates considering phenomenon of buckled mode change, *Korean Society of Civil Engineers* 18(1): 111-123.
12. Steigmann, D. J., 1990. Tention filed theory, Proc. of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences 429(1876): 141-173.
13. Thorburn, L. J., G. L. Kulak and C. J. Montgomery, 1983. Analysis of Steel Plate Shear Walls, Structural Engineering Report, 107, University of Alberta, Canada.
14. Wagner, H., 1931. Flat sheet metal girder with very thin metal web, Part I - General Theories and Assumptions, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Memorandum, 604.
15. Wilson, J. M., 1886, On specifications for strength of iron bridges, *Transactions of the ASCE* 15(1): 401-403 and 489-490.
16. Woo, S. S., S. H. Lee, and L. Chung, 2007. Shaking table test of small scale 5-story RC structure with tuned liquid damper, *The Architectural Institute of Korea* 23(2): 3-8.
17. Yang, H. G., J. W. Seo, N. S. Cho, and S. P. Chang, 2006. Shaking table test of small scale 5-story RC structure with tuned liquid damper, *Earthquake Engineering Society of Korea* 10: 123-134.
18. Yun, J. J., 1992. A study on the similitude of precast concrete panel structure using one-third scale subassemblage model, *Journal of the Korea Concrete Institute* 4(3): 123-134.