

# 전산유한요소를 이용한 벤로형 플라스틱 필름 온실의 3D 구조재 최적 설계

## A 3D-Structural Beam Optimization for a VENLO-Type Plastic-Film House using Computer Aided FEM

김경원\* 김만수\*\* 윤진하\* 전종길\* 이인복\*  
정희원 정희원 정희원 정희원 정희원

G. W. Kim M. S. Kim J. H. Yun J. G. Jeun I. B. Lee

### 1. 서론

최적화의 개념은 목적에 따라 다양하겠으나 수치해석에서는 기본적으로 설계변수를 움직여 목적함수를 최소화 혹은 최대화 하는데 있다. 열전달에서는 최소온도, motor를 설계할 때는 최대토크 등이 있고, 구조물설계에 있어서는 최소무게(Weight or Volume) 혹은 최대의 Frequency를 구하는데 최적화 수치해석이 이용되고 있다. 오늘날 컴퓨터하드웨어의 발달과 더불어 전산수치해석의 영역이 급속히 높아져가고 있으며 PC에서의 계산처리능력이 90년대의 work station급을 초과함으로써 보다 쉽게 전산수치해석이 가능하게 되었다.

농업구조물에서도 90년대 중반부터 SAP90 등의 툴을 사용하여 선형기법에 의한 2차원적 구조해석을 온실설계에 적용하였으나, 90년대 말부터 김 등(1998)은 온실의 안전성을 분석하기 위해 ANSYS 툴을 사용하여 3차원적 구조안전성을 분석하였고, 또한 김 등(2000)은 온실에 사용되는 알루미늄서까래의 단면을 최적화하기 위해 동일한 툴을 사용하여 SUMT( A Sequential Unconstrained Minimization Technique)기법이 적용된 Zero-order Method로 비선형 빔단면 최적화를 수행하였다.

현재 일본에서 풍속 45m/s에서 견딜수 있도록 벤로형 플라스틱 필름온실로 시공되고 있는 구조재를 개량하여 우리 연구소에서 개발하고 있는 지붕완전개폐형 시스템을 적용할 수 있도록 하기 위해 최적화를 수행하였으며, 최적화는 ANSYS5.6을 사용하여 Zero-order Method에 비해 많은 계산량이 요구되지만 보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 First-Order Optimization 기법으로 비선형 정적최적화를 수행하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 가. 분석모델

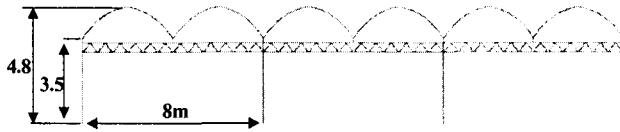
구조재 최적화 해석을 위해 적용된 온실모델의 근간은 우리나라에서 정(1999, 호남작물)이

---

\* 농업기계화연구소 기초기술기계과

\*\* 충남대학교 농과대학 농업기계공학과

개발한 개량벤로형 플라스틱 철골온실에서 서까래 설치는 아취곡면을 반경 3m로 2중 도심(double centroid)으로 하고 설치간격을 1000mm로 하였으며, 기둥의 설치간격을 3m로 하였다. 그림 1에서 보는바와 같이 온실의 크기는 3연동-폭 8m, 길이 45m로 하고 온실폭 8m



(Front view)

사이에 기둥 없이 2개의 아취가 설치되고 트러스에 의해 아취곡부의 연직하중을 기둥으로 전달시킨다. 또한 지붕도리재는 지붕 아취 중앙부 1개소, 곡부홈통과 중앙사이에 1개소로 하여 총 18개소에 설치되며 온실측면도리는 측면당 3개소에 설치된다.

(Oblique view)

Fig. 1 FEM analyzed Model of 6 span Venlo-type plastic-film house

나. 요소(element)와 물성자료

빔 요소(beam element)로 사용한 beam44 element는 비선형 비대칭 빔 특성을 나타내며 특히 종래에서는 빔의 단면정보를 외각과 단면2차모멘트로만 한정되어 있어 빔 최적화가 매우 제한적이었다. 현재 사용된 이 요소는 단면의 정확한 치수를 변수로 하여 입력파일로 처리할 수 있도록 되어있다. 설계된 element 수는 총 1만6천개이며, 적용된 요소의 물성은 표 1에서 보는바와 같다. 기둥 서까래 및 도리재, 트러스는 농업용 아연도강의 물성을 적용하였으며 곡부 물받이는 알루미늄 재료의 물성치를 사용하였다.

Table 1 Material properties of 6 span Venlo-type plastic-film house

Item	Young's Modulus(kg/mm <sup>2</sup> )	Shear Modulus(kg/mm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	Density(kg/mm <sup>3</sup> )
Zinc coated steel	21,000	8,100	0.3	7.87×10 <sup>-6</sup>
Aluminium	7,000	2,700	0.3	2.7×10 <sup>-6</sup>

다. 최적화 방법

(1) 최적화 적용 이론(Numerical background)

디자인 공간에서 추적방향성을 유도하는 목적함수와 상태변수 penalty function의 미분개념이 도입된 First-Order Optimization은 Zero-order Method와 비교하여 많은 계산이 요구되지만 보다 정확하여 구조재의 최적화의 수렴알고리즘으로 채택했다. 식 (1)~ 식 (4)는

각각 최적화 설계변수 개수와 변수의 구속범위, 목적함수, 그리고 구속범위가 포함된 상대변수를 표현한다.

$$x = [ x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n ] \dots\dots\dots(1)$$

$$x_i \leq x_i \leq \bar{x}_i \quad (i = 1,2,3,\dots,n)\dots\dots\dots(2)$$

$$f = f(x) \dots\dots\dots(3)$$

$$g_i(x) \leq \bar{g}_i \quad (i = 1,2,3,\dots, m_1)\dots\dots\dots(4)$$

이와 같이 구속된 대상들은 penalty function에 의해 식(5)로 전환된다.

$$Q(x, q) = \frac{f}{f_0} + \sum_{i=1}^n p_x(x_i) + q \left[ \sum_{i=1}^{m_1} P_g(g_i) + \sum_{i=1}^{m_2} P_h(h_i) + \sum_{i=1}^{m_3} P_w(w_i) \right] \dots\dots\dots(5)$$

매회 최적화 반복(iteration)시 추적방향벡터는 식 (6)에 따라 next 반복이 결정되도록 한다.

$$x^{(j+1)} = x^{(j)} + s_j d^{(j)} \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{here, } 0 \leq s_j \leq \frac{S_{\max}}{100} s_j^*$$

$s_j^*$  : largest possible step size for the line search of the current iteration

$S_{\max}$  : maximum(percent) line search step size

한편, 방향추적시 목적함수의 기울기는 식(7) 근사식으로 결정한다.

$$\frac{\partial Q(x^{(j)})}{\partial x_i} \approx \frac{Q(x^{(j)} + \Delta x_i e) - Q(x^{(j)})}{\Delta x_i} \dots\dots\dots(7)$$

$e$  = vector with 1 in its  $i$ th component and 0 for all other components

$$\Delta x_i = \frac{\Delta D}{100} (\bar{x}_i - x_i), \Delta D : \text{forward difference step size}$$

(2) 최적화 설계변수, 상태변수 및 목적함수

구조재의 단면을 최적화하기위해 알루미늄소재로된 gutter는 표 2에서 보는바와 같이 설계상수로 사용하여 빔 단면최적화에 제외시켰으며, 설계변수는 표 3에서와 보는바와 같이 기둥을 포함한 7개의 부재에서 보침의 높이, 폭 등에 대해 총 16개로 하여 최적화를 수행하였다.

상태변수는 부재가 받는 조합응력(축방향응력, 굽힘응력 및 전단응력의 합)으로 평가하고 온실구조재에 작용하는 바람과 적설이 단기하중임을 고려하여 조합응력이 24kg/mm<sup>2</sup>이하에서 수렴되도록 하였다. 또한 목적함수는 각각의 빔 부재의 부피를 천체 부재의 길이로 나누어 이를 합산하여 부재 단면을 최소화하는 알고리즘으로 하였다.

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n A_i L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \dots\dots\dots(8)$$

$A$  : 빔의 단면적,  $L$  : 빔의 길이.

Table 2 Cross-section values of gutter member

Item	Cross section size(mm)	Cross section area (mm <sup>2</sup> )	Moment of inertia of area(cm <sup>4</sup> )	remark
gutter	$\sqrt{107h*161w}$	2202	265	design constant

Table 3 Initial cross-section values and constrain limits of design variables for members

Item	Cross section size(mm)	Cross section area (mm <sup>2</sup> )	Moment of inertia of area(cm <sup>4</sup> )	Limit range of design variables constrain(mm)
column	□100h*50w*2.3t	669	88.2	50 ≤ h ≤ 150 30 ≤ w ≤ 100 1.5 ≤ t ≤ 4.5
Rafter	○31.8 ϕ *1.5t	143	1.6	25.4 ≤ ϕ ≤ 50.8 1.2 ≤ t ≤ 2.0
purline(roof)	○38.1 ϕ *1.6t	183	3.1	25.4 ≤ ϕ ≤ 50.8 1.2 ≤ t ≤ 2.0
purline(side,front)	○38.1 ϕ *1.6t	183	3.1	25.4 ≤ ϕ ≤ 50.8 1.2 ≤ t ≤ 2.0
column(stud)	□50h*50w*2.3t	439	16.7	50 ≤ h ≤ 150 30 ≤ w ≤ 100 1.5 ≤ t ≤ 4.5
truss	chord(T,B)	□50h*30w*2.3t	347	40 ≤ h ≤ 100 20 ≤ w ≤ 50 1.5 ≤ t ≤ 3.2
	dia.member	●16 ϕ	201	25.4 ≤ ϕ ≤ 50.8

(3) 경계조건

온실의 지붕에 작용하는 적설은 설치간격이 1000mm인 지붕서까래에 수직으로 작용하므로 식 (9) (하명재,1994, 건축구조실무편람)에 의해 눈의 평균단위 중량(p)은 1.0kg/m<sup>2</sup>cm, 설계적설심을 50cm으로 하고 곡부의 경사도지수(Cs)는 1.5, 기타 부는 0.5로 하여 서까래의 요소절점에 가력하였다.

$$P_s = p \times Z_s \times C_s \dots\dots\dots(9)$$

here,  $P_s$  : 적설하중(kg/m<sup>2</sup>),  $p$  : 눈의 평균단위중량(kg/m<sup>2</sup>cm),  $Z_s$  : 설계적설심(cm)  
 $C_s$  : 지붕의 경사도 및 형상에 따른 지수

바람에 의해 온실에 작용하는 풍하중은 바람 방향이 온실 측면과 수직일 때를 기준으로 하였

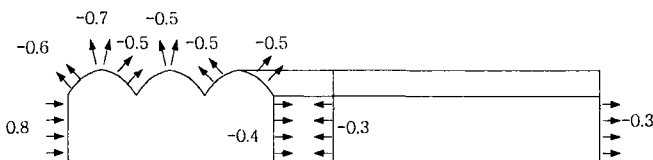


Fig. 2 Wind coefficient of Venlo-type plastic filmed when wind direction is from left to right

$$P_w = C \times Q \dots\dots\dots(10)$$

here,  $P_w$  : 풍하중(kg/m<sup>2</sup>),  $Q = 0.0197 V^2 \sqrt{h}$ ,  $V$ : 설계풍속,  $h$  : 온실평균높이

자중과 작물하중 및 장비하중으로된 고정하중에서 자중은 프로그램에서 계산되도록 하였으며 작물하중은 15.0kg/m<sup>2</sup>으로 하여 트러스 상하현 부재에 등분포 압력으로 가력하였으며 장비하중은 고려하지 않았다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 구조재의 최적화 결과

온실 구조재의 단면을 최적화한 결과 그림 3에서 보는바와 같이 풍하중에서는 20set에서 단면총합이 1073.4mm<sup>2</sup>로 그리고 설하중에서는 21set에서 단면총합이 506.5mm<sup>2</sup>로 최적화 수렴되었다.

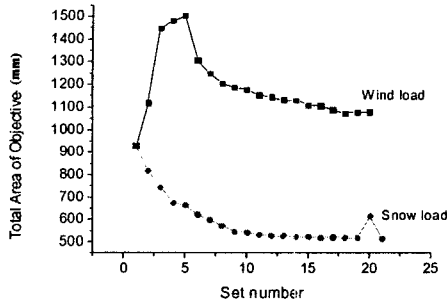


Fig. 3 Minimized Cross-section according to design sets

이 때 설계변수는 표 4에서 보는바와 같이 적설하중 보다 풍하중 상태에서 보다 큰 단면력이 요구되었다. 특히 풍하중에서 기둥은 □148.8h\*75.9w\*2.8t로 크게 나타나 풍상면에서 작용하는 수평력이 기둥에 직접 전달됨을 알수있었다.

Table 4 Optimized design variables under 50cm of snow depth and 45m/s of wind speed

Item	Initial cross-section (mm)	Optimized cross section parameter(mm)			Combined maximum stress(kg/mm <sup>2</sup> ) $\sigma_s/\sigma_w$	
		$h_s$ or $\phi$ / $h_w$ or $\phi_w$	$w_s/w_w$	$t_s/t_w$		
column	□100h*50w*2.3t	50.5/148.8	30.0/75.9	1.5/2.8	9.1/23.9	
Rafter	○31.8 $\phi$ *1.5t	25.4/25.4	-	1.2/1.3	6.5/18.8	
purline(roof)	○38.1 $\phi$ *1.6t	25.6/31.5	-	1.2/1.5	13.8/4.9	
purline(side,front)	○38.1 $\phi$ *1.6t	27.0/43.8	-	1.4/1.6	1.6/23.6	
column(stud)	□50h*50w*2.3t	50.0/71.9	44.4/70.3	1.7/2.7	1.1/18.7	
truss	chord(T,B)	□50h*30w*2.3t	46.4/89.5	20.1/44.5	1.5/2.2	23.1/23.8
	diag member	●16 $\phi$	13.0/13.0	-	-	5.1/16.2

최적화 결과로부터 적설 및 바람에 의한 조건을 모두 만족하기 위해서는 두 조건에서 상위의 설계변수 결과값인 바람 45m/s에 의한 최적화 결과치를 선정하고, 온실시공에 적하기 위해서는 기존의 생산품(각형강관은 KSD 3568, 원형강은 KSD 3504 그리고 원형 아도 강관은 KSD 3760 농업용아연도강관)을 고려하여 표 5와 같이 수정하였다.

Table 5 Modified design variables from optimized results under 45m/s of wind speed

Item	Modified cross-section (mm)	Cross section area (mm <sup>2</sup> )	Moment of inertia of area(cm <sup>4</sup> )	Combined maximum stress(kg/mm <sup>2</sup> ) $\sigma_s/\sigma_w$	maximum deformation(mm)	
column	□150h*80w*4.5t	1937	563.0	15.8	U <sub>x</sub> =2.5	
Rafter	○25.4 $\phi$ *1.4t	105	0.7	17.8	U <sub>y</sub> =13.5	
purline(roof)	○31.8 $\phi$ *1.5t	143	1.6	4.9	U <sub>y</sub> =14.1	
purline(side,front)	○43.8 $\phi$ *1.6t	212	4.7	23.4	U <sub>y</sub> =0.5	
column(stud)	□75h*75w*3.2t	892	75.5	14.7	U <sub>x</sub> =0.9	
truss	chord(T,B)	□90h*45w*2.3t	586	61.0	22.4	U <sub>y</sub> =3.3
	dia.member	●13 $\phi$	133	0.1	15.8	-

풍속 45m/s에서 구조재에 작용하는 조합응력은 23.4kg/mm<sup>2</sup>으로 측면도리에서 최대였으며 최소 조합응력은 지붕도리에서 4.9kg/mm<sup>2</sup>로 나타났고 부재별 변형은 모두 허용치에 들었다.

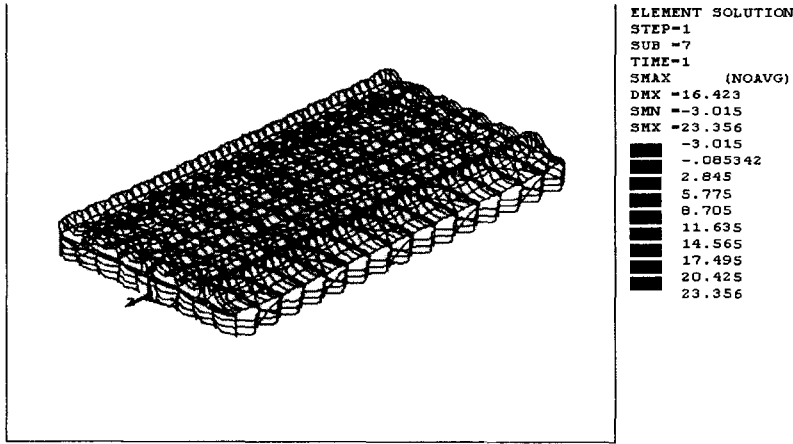


Fig. 4 Maximum combined stress under 45m/s of wind speed

#### 4. 요약 및 결론

벤로형 플라스틱 필름온실에 대해 ANSYS 5.6프로그램을 사용하여 3차원적 구조재의 최적설계를 수행한 결과,

- 풍속 45m/s에서의 부재별 단면치수는 기둥은 □150h\*80w\*4.5t 서까래는 ○25.4φ\*1.4t, 지붕도리재는 ○31.8φ\*1.5t, 측면도리는 ○43.8φ\*1.6t, 셋기둥은 □75h\*75w\*3.2t, 트러스 현재는 □90h\*45w\*2.3t, 트러스 사재는 ●13φ로 나타났으며, 외각기둥의 단면적을 줄이기 위해 풍상면에 작용하는 풍하중을 감소시켜야 하고 이를 위해 온실 측면을 덧하우스 등으로 처리할 필요가 있다.
- 이 때 구조재에 작용하는 조합응력은 측면도리에서 23.4kg/mm<sup>2</sup>으로 최대였으며 최소 조합응력은 지붕도리에서 4.9kg/mm<sup>2</sup>로 나타났고, 부재별 변형은 모두 허용치에 들었다.
- 구조재의 최적화를 3차원적으로 처리함으로써 구조의 안전성과 경제성이 동시에 확보가 가능할 것으로 판단되었다.

#### 5. 참고문헌

1. 김경원 등. 1998. 유한요소법을 이용한 농가보급형 자동화비닐하우스의 3차원적 구조안전성 분석. 한국농업기계학회 하계학술대회 vol.3. N0.2
2. 김경원 등. 2000. 철골경량 연질온실용 알루미늄서까래의 최적설계에 관한연구. 한국농업기계학회 동계학술대회. Vol.5 No.1
3. 대한건축학회. 1983. 강구조계산 및 해설
4. 농어촌진흥공사. 1995. 원예시설의 구조안전기준 작성(최종)
5. 허명재. 1994. 건축구조실무편람
6. 호남온실작물연구소. 1999. 개량벤로형 플라스틱 철골온실 설계도