

**철골경량 연질온실용
알루미늄 서까래의 최적설계에 관한 연구**
Study on an Design Optimization of Aluminium Rafter's
Profile for the Light Weight Steel Construction
in Plastic film Greenhouse

김경원*	윤진하*	전종길*	오병기*
정희원	정희원	정희원	정희원
K.W.Kim	J.H.Yun	J.K.Jeun	B.K.Oh

1. 서론

IMF 위기와 더불어 우리나라의 온실보급 추세는 유리온실 보다 평당 건축시공비가 저렴한 철골경량온실쪽으로 방향전환이 일어나고 있으며 2000년 농림부사업지침서에서도 농가보급형 경량온실인 각관형 비닐온실 등이 포함되어있기도 하다. 또한 1998년부터 우리나라에서는 무기동비닐온실, 경량형 파이프온실 등에 내구수명이 10년이상되고 적외선투과과장대가 500~680nm영역에서 90%이상되고 10년이상 태양노출에서 기계적 특성 및 소광투과성이 초기대비 90% 이상 유지되는 불소연질필름을 외피복재로 하여 약 6000평 정도 시공되었다.

또한 온실의 환경제어가 용이하고 구조안전성이 높은 철골구조온실에 내구수명이 높은 불소연질필름을 외피복재로 사용함으로써 건축비가 저렴하고 유리온실과 비슷한 온실내구성을 가진 철골경량형 온실보급과 함께 이 필름을 조립고정할 수 있는 적합한 조립구조재의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

한편, 철골온실의 조립구조재는 외피복을 결합시키는 기능성 등이 확보되어야 하기 때문에 단면형상이 복잡하여 소재를 압연강으로 하는데는 어려움이 있다. 불소연질필름의 조립구조재의 소재는 온실 경량화가 가능하고 내부식 등에도 유리한 압출알루미늄소재를 사용한다. 그러나 압연강(700원/kg)에 비하여 알루미늄(2,200원/kg)의 가격이 3배이상으로 매우 고가이기 때문에 경제적 최소투입량이 되도록 최적의 단면을 계산하는 것은 매우 중요하다.

따라서 본 연구는 철골경량온실의 조립구조재 개발의 일환으로 철골경량온실지붕 부위의 알루미늄조립구조재 총 무게에서 약 50%정도를 차지하고 또한 지붕도리재 위에 걸쳐고정되어 적설 혹은 바람 등의 외력에 의해 굽힘력 등이 작용하는 서까래에 대하여 최적단면을 ANSYS(FEM Program)으로 비선형 해석하고 보의 단순 집중하중실험에 의해 해석결과치를 검증하여 최적의 철골경량온실용 알루미늄서까래를 개발하는데 있다.

* 농촌진흥청 농업기계화연구소

2. 재료 및 방법

가. 지붕형 조립구조재의 설계하중산정 및 허용 안전응력

서까래는 그림1과 같이 지붕물매방향으로 지붕과 천창에 각각 600mm간격으로 설치되며 최대 1m의 고정지간을 유지하는 것으로 하였으며, 적설 및 풍하중에 의한 설계하중을 산정하여 서까래 상부 node의 양단 300mm영역은 기울기 =1의 구배하중 그리고 가운데 400mm영역은 등분포하중을 가력하였다. 서까래로 사용된 알루미늄은 농림특정연구과제인 첨단유리온실용 알루미늄구조재의 규격표준화 및 적합소재개발('96~'98)에 의해 온실용으로 개발된 Al-Mg-Si-Cu계 합금으로 하고 이 합금을 사용하였다.

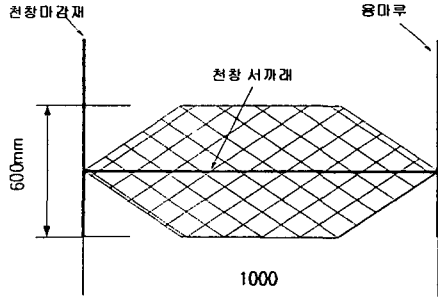


Fig. 1 Load Distribution of Rafter

1) 설계하중산정

철골구조와는 달리 알루미늄조립구조재인 서까래는 바람 및 적설에 의한 외력만 고려하면됨으로 작물 등의 기타 하중의 영향은 없는 것으로 하였다.

내구년수 20년 안전율70% 제현기간 57년에 의해 우리나라의 울릉도, 동해산간 및 일부 도서 등을 제외하고는 중부이하 전지역에서 사용가능하도록 설계풍속 50m/s, 수직최심적설깊이를 1m로 하여 풍 및 적설설계하중을 산정하였다. 설계풍하중은 표1에서와 같이 총 -29.4kg의 하중이 서까래에 작용하는 것으로 산정되었다.

Table 1 Wind Load

Wind Coefficient C	Wind Velocity V ₀ (m/s)	Wind Pressure P _w (kg/m ²)=0.04×C×V ₀ ²	Design Load of Wind P(kg)=P _w ×Area
-0.7	50	-70	-29.4(70×0.42m ²)

설계적설하중은 표 2에서와 같이 총 47.3kg이 서까래에 작용하는 것으로 산정되었다. 따라서 풍하중에 비하여 적설하중이 크므로 적설하중치를 최적설계의 외력으로 사용하였다.

Table 2 Snow Load

Snow Depth D(cm)	Density of Snow ρ _s (kg/cm ³ ·m ³)	Coefficient of Sloped Roof, C _s	Snow Pressure P _s (kg/m ²)= C _s ×D×ρ _s	Design Load of Snow P(kg)=P _s ×Area
100	1.5	0.75	112.5	47.3(112.5×0.42m ²)

2) 허용안전응력

인장강도는 32kg/mm², 항복강도는 26.4kg/mm²을 나타내는 개발알루미늄의 허용안전응력은 안전율 2.0로 하여 Von Mises 항복응력 13.2kg/mm²로 하였다.

나. 서까래의 기본단면형상 설계

서까래의 상부에 두께 0.07mm의 불소연질필름이 올려지고 이를 고정하기위해 서까래 덮개가 부착되고 서까래덮개, 필름 및 서까래가 일체가 되도록 20~30cm간격으로 피스고정을 하도록 서까래의 기본형상을 최적화 설계에 앞서 그림2와 같이 설계하였다.

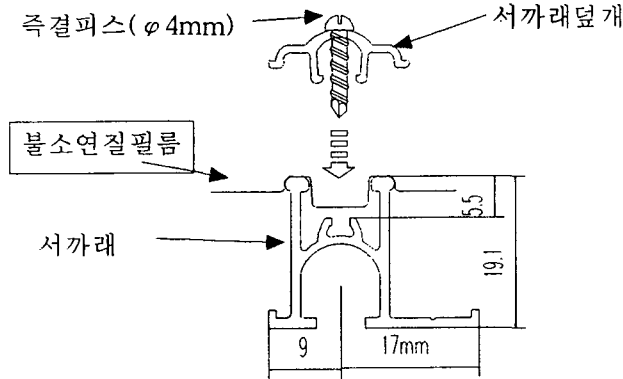


Fig. 2 Basic Model of Rafter

서까래단면 내부는 아취형으로 하고 피스고정부의 높이를 4mm로 하여 피스관통에 의한 서까래와 덮개의 고정력이 크게 작용하도록 하였다. 또한 서까래 하단의 중심부는 C형강 도리재위에 걸쳐서 φ6mm볼트에 의한 고정이 되도록 설계하였다.

다. 경계조건

중탄성계수 7000kg/mm², 횡탄성계수 2700kg/mm², Poisson'ratio 0.33, 밀도 2.7×10⁻⁶kg/mm³를 물성치로 사용하였으며, 요소(element)는 비선형 해석이 가능한 Shell 181을 사용하였다.

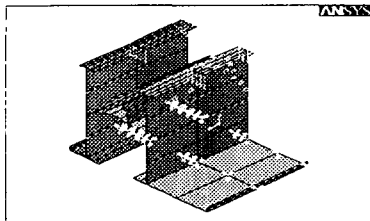


Fig. 3 Boundary Condition

그림 3과 같이 양단은 고정단으로 하고 element Z방향(서까래길이)의 길이는 10mm로 하여 양단 300mm영역에는 각각 10.15kg, 가운데 400mm영역은 27kg의 등분포하중이 작용하도록 가력 하였다.

라. 최적설계

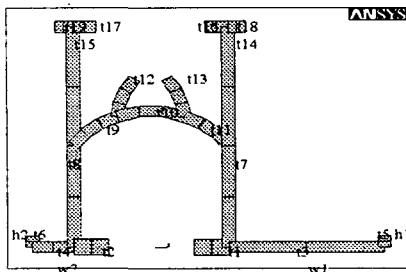


Fig. 4 Location of Design Variables for Optimization

설계변수는 그림 4와 같이 두께 19종과 폭 및 높이를 각각 2종으로 총 23개의 변수를 사용하여 식 1에 적용되도록 하고 상태변수인 Von Mises 항복응력은 13.2kg/mm²이하가 되도록 식 2에 적용되도록 하였으며 최소두께는 식 3~5과정과 SUMT algorithm과정에 의해 수렴되도록하고 20개 Design Set가 되도록 하였다.

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

$$\hat{g}(x) = g(x) + \text{error} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\hat{f}(x) = f(x) + \text{error} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\hat{f} = a_0 + \sum_i a_i x_i + \sum_i \sum_j b_{ij} x_i x_j \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$E^2 = \sum_{j=1}^{n_d} \phi^{(j)} (f^{(j)} - \hat{f}^{(j)})^2 \quad \dots \dots \dots (5)$$

here,
 x_i = design variable of i , g = state variable, f = objective function
 $\phi^{(j)}$ = weight associated with design set j , n_d = current number of design sets

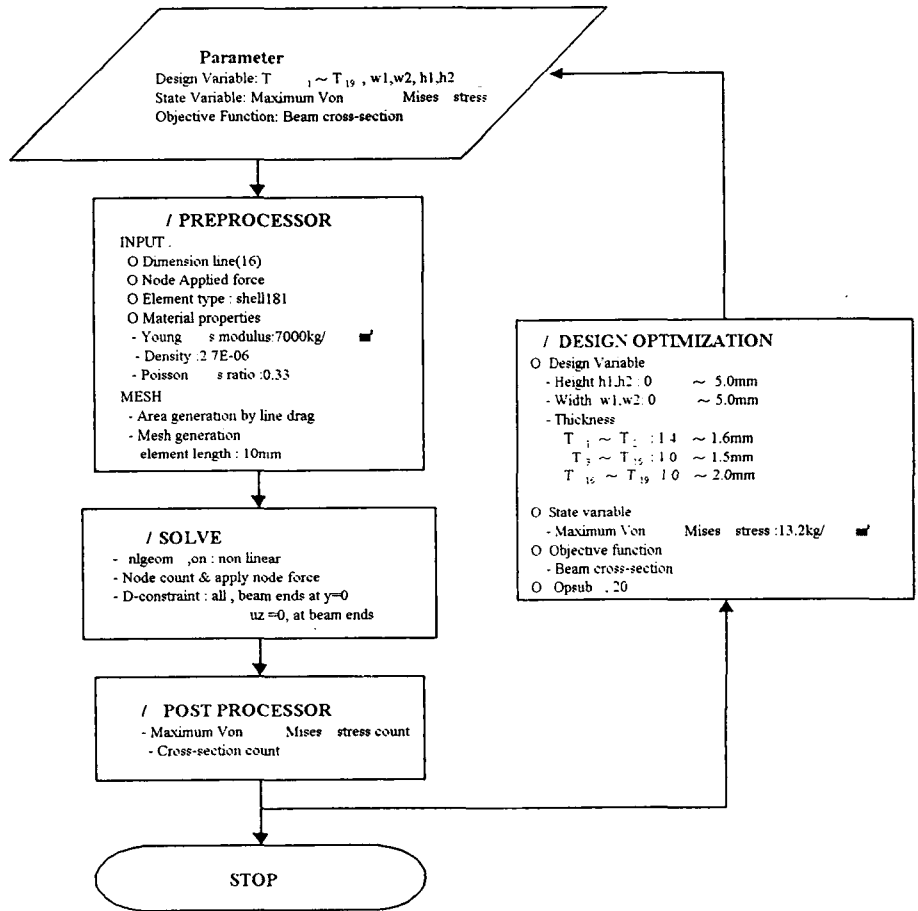


Fig. 5 Flow of Optimization

마. 기계역학특성 검증

굽힘내력에 의한 설계치와 실험치를 비교하기 위하여 최적설계한 서까래를 Al-Mg-Si-Cu 계 합금으로 압출한후 T-5열처리 하였다. UTM-5T를 사용하여 지간 1m의 단순지지보로 5mm/min등속도에 의한 집중하중을 가력하여 항절시험하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 서까래의 최적설계 결과

최적화 수렴에서 20개의 design set 모두가 상태변수인 Von Mises 허용응력 $13.2\text{kg}/\text{mm}^2$ 이하에서 수렴하였고 그림 6에서와 같이 Set No. 16에서 최소단면적 105mm^2 값으로 수렴되었다.

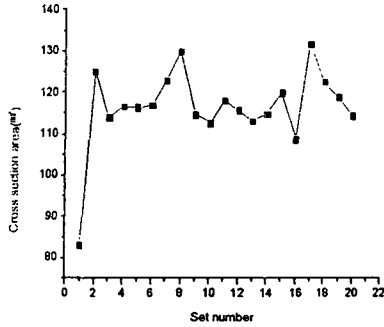


Fig. 6 Minimized Cross-section Area at Design Sets

수가 0.52 및 0.38cm^3 를 나타내었다.

이때 설계변수인 높이는 20.1mm, 폭은 24.8mm로 나타났고 서까래하단부 볼트고정부는 1.5mm 그리고 상단부 필름지지부는 1.8mm의 두께를 나타냈다. 최적화 Set에서의 Von Mises 응력은 그림 7과 같이 굽힘모멘트가 최대로 작용하는 양단고정부에서 최고값 $12.0\text{kg}/\text{mm}^2$ 로 나타냈다. 최대의 응력부위는 서까래의 상하단부를 중심으로하여 나타났으며 하단부는 Flange가 짧은 부위에서 가장높은 응력 위치였다. 그림 8은 최적설계한 서까래형상으로서 단면2차모멘트가 0.44cm^4 단면계

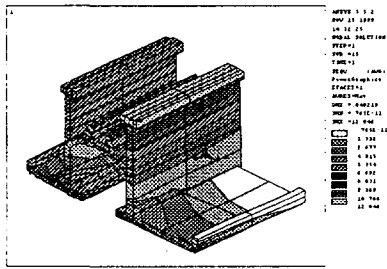


Fig. 7 Von Mises Stress Contour at the ends of Rafter

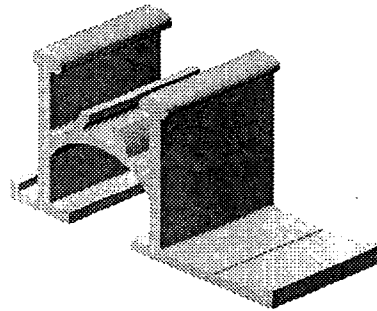


Fig. 8 Optimized shape of rafter

나. 서까래의 기계역학특성 평가

최적설계한 서까래에 대하여 단순지지 집중하중에 의한 항결시험 결과 그림 9에서 보는

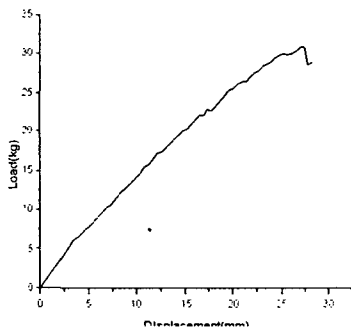


Fig. 9 Transverse Test Result

바와 같이 항복하중은 30kg으로 이때의 항복변위는 27.4mm였다. 집중하중에서 서까래 중앙부의 모멘트는 $PL/4=750\text{kg} \cdot \text{cm}$ 로 최대여서 이를 고정단 등분포 모멘트로 환산하면 $M= PL(L^2-2a^2+a^3/L)/(12(L(L-a)))=PL \times 1.21/12$ 로 되어 단순집중하중의 2.5배가 되어 등분포하중에 대한 내력이 75kg 정도이다. 최적설계에 가력된 등분포 하중 47.3kg은 Von Mises $12.0\text{kg}/\text{mm}^2$ 응력을 나타내므로 $26.4\text{kg}/\text{mm}^2$ 의 항복응력에서 내력이 104kg에 해당하므로 최적설계치와 비교하여 내력이 27.9%높게 평가되었다. 압출금형의 제작과정에서 설계치보다 약

-10%정도의 치수공차를 주어 알루미늄서까래를 압출한 결과를 고려할 때 약 17%정도의 해석오차가 발생하였다고 판단된다.

4. 요약 및 결론

서까래의 기본단면을 설계한후 설계하중을 산정하고 유한요소법 해석용 ANSYS5.5프로그램을 사용하여 철골경량온실용 알루미늄 서까래를 최적설계하고 온실용으로 새로 개발된 알루미늄합금을 압출하여 항절시험으로 검증한 결과는 다음과 같다.

1) 최적수렴된 단면적은 105mm², 높이는 20.1mm, 폭은 24.8mm로 나타났고 서까래하단부 볼트고정부는 1.5mm 그리고 상단부 필름지지부는 두께는 1.8mm로 나타났다. 최적화 Set에서의 Von Mises 응력은 굽힘모멘트가 최대로 작용하는 양단고정부에서 최고값 12.0kg/mm²로 나타났고 최적설계한 서까래의 단면2차모멘트는 0.44cm⁴, 단면계수는 0.52 및 0.38cm³를 나타내었다.

2) 단순지지 집중하중에 의한 항절시험 결과 항복하중은 30kg으로 이때의 항복변위는 27.4mm였다. 집중하중에서 서까래 고정단 등분포하중은 75kg 정도로 되었다. 최적설계에 가력된 등분포 하중 47.3kg은 Von Mises 12.0kg/mm² 응력을 나타내므로 26.4kg/mm²의 항복응력에서 내력이 104kg에 해당하므로 최적설계치와 비교하여 내력이 27.9%높게 평가되었다. 그러나 압출금형의 제작과정에서 설계치보다 -10% 정도의 치수공차가 있음을 고려할 때 약 17%정도의 해석오차가 발생하였다고 판단된다.

5. 참고문헌

1. 대한건축학회. 1983. 강구조 계산 기준 및 해설
2. 허명재. 1994. 구조실무편람
3. 장준호. 1996. 건축구조계산 편람
4. 정일영외2인. 1992. 강도설계법과 허용응력도 설계법의 부재능력에 대한 비교연구. 대한건축학회논문집 8권1호
5. 김경원의5인. 1998. 유리온실용 알루미늄구조재의 규격표준화 및 적합소재 개발(농림특정)
6. 김경원의3인. 1998. 유한요소법을 이용한 농가보급형자동화 비닐하우스(1-2w) 3차원 구조 안전 분석(하계학술대회)
7. 고재군외2인. 1986. 시설하우스 안전구조설정을 위한 역학적 연구. 농시논문집(농업산학협동편). 농촌진흥청
8. 농어촌진흥공사. 1995. 원예시설의 구조안전기준 작성(최종)
9. Przemieniecki, J.S. 1968. Theory of matrix structural analysis. Macgraw- hill. New York