

조립식 클립형 비닐하우스의 강풍 및 폭설시 구조 안정성 평가

노경철*

¹동양대학교 철도차량학과

An Evaluation of the Structural Stability of a Clip Type Prefabricated Greenhouse under Strong Wind and Heavy Snow Conditions

Kyoung-Chul Ro^{*}

¹Department of Railroad Vehicle Engineering, Dongyang University

요약 본 연구는 폭설 및 강풍 시 조립식 비닐하우스의 구조안정성을 해석하였으며, 내재해 규격 중 가장 엄격한 기준인 적설량 40 cm, 풍속 40m/s를 재해 기준으로 고려하여 적설 하중 및 풍 하중이 비닐하우스 구조에 미치는 영향을 분석하였다. 풍 하중의 경우, 공기역학적 특성에 의해 비닐하우스의 형상에 따른 국부적인 압력 분포 특성이 상이하기 때문에 유체-고체 연성 해석 기법을 적용하였다. 적설하중 및 풍하중 해석 결과에서 비닐하우스 하단지지 파이프와 지붕서까래 체결 부분 근처에서 가장 큰 응력 및 변형이 발생하며, 적설 하중에 비해 풍 하중 시 구조 안정성이 다소 취약함을 확인하였다. 따라서 본 연구 결과를 기반으로 지지 파이프의 변형을 최소화 하면서 설치 및 유지보수가 용이한 조립식 연결 클립 설계를 위한 기초 자료로 활용할 예정이다.

Abstract Numerical studies were performed to evaluate the structural safety of a greenhouse under both snow and wind loads. In the case of a wind load, fluid-structure interaction (FSI) method was used to consider the local pressure distributions on the greenhouse-induced by aerodynamic characteristics. The results showed that the maximum stress and deformation occur near the junction of pipe supports and rafters of the roof, where connecting clips are installed. Moreover, the wind load is a more severe condition than a snow load. Overall, these results will be used to design a prefabricated connecting clip with easy installation and low maintenance.

Key Words : Fluid-Structural Interaction, greenhouse, wind load, snow load, structural safety

1. 서론

비닐하우스는 적은 비용으로 간단하게 설치하여 사용할 수 있는 이점이 있어 많은 농가에서 활용 되고 있으며, 기후변화 및 고소득 창출 목적으로 인하여, 비닐하우스를 이용한 온실 농업은 더욱 가속화 될 것으로 전망된다. 그러나 해마다 연간 3천억 이상의 대규모 피해가 빈발하고 있으며, 특히 재해원인으로는 폭설이 약 78 %를 차지하고 있는 것으로 조사되어 농가 피해의 대부분을 차지하고 있다[1].

비닐하우스는 가설물로서 농립수산식품부의 내재해 규격을 만족해야 되며, 구조 안정성 평가 및 개선 연구는 오래전부터 진행되어 왔다[2-5]. 특히 단동 및 연동 비닐하우스의 구조개선에 대한 연구는 가시적인 성과를 보여 내재해형 비닐하우스 규격을 제시하였으나, 현장에서는 무분별한 시공으로 인하여 폭설 및 태풍 등의 자연 재해에 근본적으로 취약하고 비닐하우스 형태 또한 매우 다양하여 안정성이 확보되지 못하고 있는 실정이다. 또한 복구 시에 기존 자원을 활용하지 못하여 폐자재 증가와 더불어 농가에 큰 부담이 되고 있다.

본 논문은 동양대학교 교내연구과제 연구비지원을 통해 수행되었음.

*Corresponding Author : Kyoung-Chul Ro(Dongyang Univ.)

Tel: +82-54-630-1384 email: kcro@dyu.ac.kr

Received May 8, 2014

Revised June 10, 2014

Accepted June 12, 2014

이러한 문제점들을 해결하기 위해 설치 및 유지보수가 간단한 직관 파이프를 이용한 조립식 비닐하우스의 개발이 진행되고 있으며, 구조적인 안정성만 확보된다면 기존의 절곡식 파이프 비닐 하우스의 대체 및 시장규모 확대 또한 가능할 것으로 전망되며, 재해 시 비닐하우스가 파손 되더라도 파이프의 재활용이 가능하여 복구 기간 및 비용의 최소화가 가능하다.

조재용 등[6]은 삼각형 타입 조립식 비닐하우스의 파이프 지름 및 두께 변화에 따른 폭설 상황에서의 구조 안정성을 평가하였으며, 조립식 비닐하우스도 형상 및 구조에 따라 기존 절곡식 비닐하우스를 대체할 수 있음을 보여주었다.

그러나 조립식 비닐하우스는 연결클립의 표준 및 규격이 존재하지 않기 때문에 기존 절곡식 비닐 하우스에서 사용된 연결클립을 사용하거나, 조립 편의만을 고려하여 결속력 및 강성이 부족한 연결클립을 사용하는 경우가 많기 때문에 농가 보급에 어려움이 있었다.

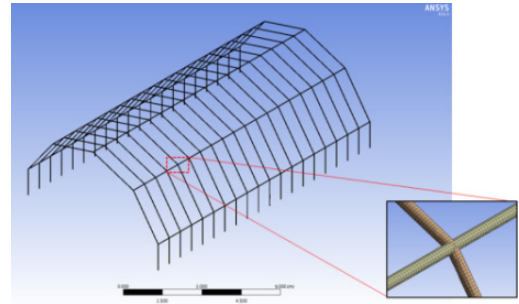
따라서 본 논문에서는 절곡식 비닐하우스와 형상이 가장 유사하며 내부 체적이 상대적으로 큰 육각형 조립식 비닐하우스의 폭설 및 강풍 시에 구조안정성을 해석하였으며, 재해 기준은 농림 수산식품부에서 정한 내재해 규격 중 가장 혹독한 조건인 폭설 40 cm, 풍속 40 m/s에 대해 해석을 수행하였다. 특히 풍속 해석은 비닐하우스 외부면 마다 압력 분포가 상이하기 때문에 추가로 전산유체해석(CFD)을 수행한 후 그 결과를 이용하여 구조 해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해 연결부위 및 지지부의 응력 및 변형을 파악한 후 조립식 연결 클립 개발을 위한 기초자료로 활용 하고자 한다.

2. 수치해석 방법

2.1 조립식 비닐하우스 구조

구조 안정성 평가를 위한 조립식 비닐하우스는 농가에서 가장 널리 사용되는 25 평형(폭 : 7 m, 길이 : 12 m)을 표준 모델로 선정하였다. 비닐하우스는 2 개의 측고 하단 지지부와 5 개의 서까래를 이어 하나의 단을 구성하며, 비닐하우스 길이 방향의 5개의 도리가 60 cm 간격으로 설치된 총 20 단을 고정한다.

각 단의 지붕 서까래는 144도 연결클립을 이용하여 다섯 개의 절점을 가지는 육각 구조이며, 구체적 형상은 Fig. 1과 같다.



[Fig. 1] 3-Dimensional modelling and grid generation of clip type prefabricated green house

[Table 1] Mechanical properties of steel pipe

Inner Diameter	Outer Diameter	Diameter allowance
Φ 20	Φ 25	±0.5 mm
Thickness	Weight	Modulus of elasticity
2 mm	1.60 kg/m	2.1 x 10 ⁶ kg/cm ²

2.2 구조해석용 모델링 및 격자 구성

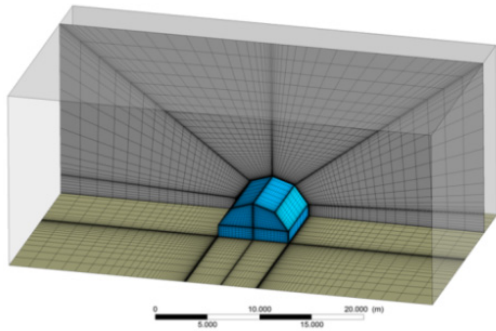
비닐하우스는 골격을 이루는 파이프 위에 비닐을 덧씌우는 형태이므로, 비닐에 작용하는 하중은 주위 골조로 분산된다. 따라서 본 연구에서는 비닐에 작용하는 하중이 4방향의 파이프 구조로 고루 분산 된다는 가정 하에 비닐을 제외한 파이프 구조만을 모델링 하였다.

파이프의 직경 및 두께, 물성치는 Table. 1에 표기된 값을 사용하였으며, 격자 생성은 ANSYS Modeler 14.5를 이용하여 총 423,385 개의 절점으로 구성하였으며, 최대 격자 크기는 3 cm 이내로 유지 하였다.

2.3 전산유체 해석 모델링 및 격자 구성

풍향, 풍속 및 비닐하우스 형상 등은 대표적인 비닐하우스에 영향을 미치는 유동 특성 인자이며, 이에 따라 비닐하우스 표면에 작용하는 풍하중이 결정된다. 따라서 풍하중에 의한 정확한 구조 해석을 위해서는 유동 해석을 통해 비닐하우스 외면에 가해지는 국부적인 압력 분포 및 풍하중을 얻어야 하며, 이를 위해 유체-구조 연성해석 (Fluid -Structure Interaction, FSI) 기법이 요구 된다.

비닐하우스 주위를 지나는 유동 해석을 하기 위해 Fig. 2와 같이 비닐하우스 비닐을 포함한 전체 형상과 외부 유동해석을 위해 비닐하우스를 둘러싼 외부 영역을 하우스 전체 길이의 약 5배 이상이 되도록 모델링 하였으며, 난류 유동 해석을 위해 비닐하우스 면으로부터의 첫



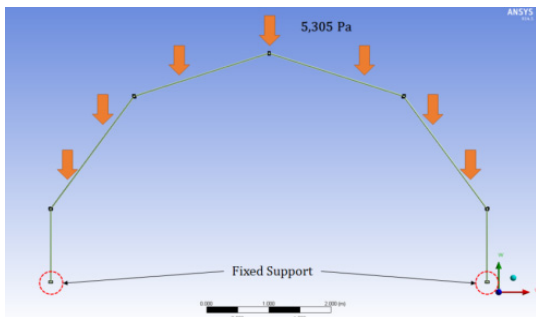
[Fig. 2] Grid generation for Computational Fluid Dynamics with symmetric condition

격자 크기를 조절하여 하여 y+ 값을 30 이내로 유지하였다. 또한 비닐하우스의 아치가 꺾이는 부분에서는 유동 박리에 의한 와류가 형성될 것으로 판단되어 다음과 같이 아치의 모서리 부분에서도 격자 크기를 조밀하게 하였으며, 총 격자 개수는 격자 민감도 테스트를 통해 약 26만개로 구성되었다.

2.4 경계조건 및 해석 조건

2.4.1 적설 하중 조건

적설 하중은 관련법령인 기상법 제35조(기상업무 종사자 등의 교육·훈련)에 의거 눈의 밀도는 0.3 kg/m^3 으로 산정하였다. 비닐하우스 지붕의 면적을 고려하여 40 cm가 적설 되었을 경우 약 10,080 kg의 적설 하중이 비닐하우스 지붕에 작용한다. 또한 적설 하중이 비닐에 의해 서까래 및 도리로 이루어진 지붕 골격 구조로 고르게 전달된다고 가정을 통해, 적설 하중을 지붕 골격 구조의 투사 면적으로 나누어 얻은 적설 하중 압력(5,305 Pa)을 Fig. 3과 같이 서까래 및 도리 구조에 적용하였다.



[Fig. 3] Pressure boundary condition due to snow loads for structural analysis

비닐하우스를 현장에서 설치할 경우 일반적으로 마름모꼴의 콘크리트를 타설하고 여기에 파이프를 고정시켜서 하우스를 제작한다. 따라서 지면에서 평면 방향으로의 이동 및 연직 방향으로의 움직임은 매우 제한적이다. 따라서 각 단의 측고 하단 지지 파이프의 기단 부에는 고정 조건(Fixed support condition)을 적용하여 모든 변위는 제한하였다.

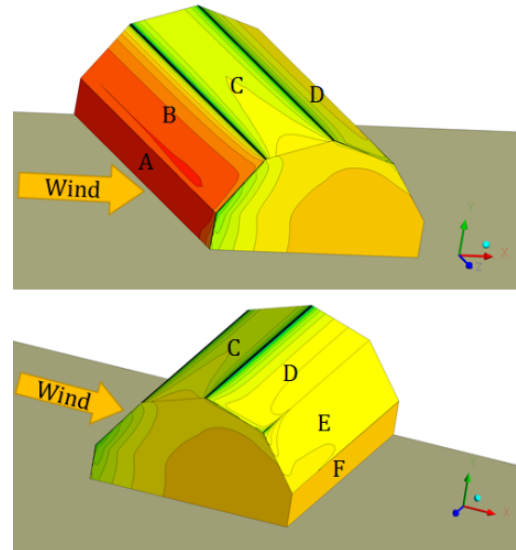
2.4.2 풍 하중 조건

2.4.2.1 유동해석 경계 조건

풍속은 지면과 평행한 방향(+x 방향)으로 40 m/s 이고 입구 조건으로서 Fig. 2의 왼쪽 벽면에 속도 유입 (Velocity inlet) 조건을 적용하였다. 비닐 하우스의 벽면은 비닐이 찢어지지 않아 모든 하중이 비닐하우스 구조로 전달되는 최악의 경우를 가정하여 강체이며, 비닐하우스 외부면에서는 점착(no-slip) 조건을 적용하였다. 지면을 제외한 나머지 면은 외기 부분이기 때문에 정압 조건으로 0 Pa 를 적용하였다.

2.4.2.2 구조해석 경계 조건

Fig. 4와 같이 유동해석을 통해 얻은 비닐하우스의 각 벽면에 작용하는 풍하중을 적설 하중 압력을 구하는 방법으로 각 골격 구조에 작용하는 풍하중 압력을 구하였다. 압력의 작용 방향은 유동해석에서 얻은 풍하중의 방



[Fig. 4] Pressure distribution on each plane in the greenhouse from CFD analysis

[Table 2] Pressure acting on each pipe under wind load condition

Position	Pressure[Pa]	Position	Pressure[Pa]
A	4,576	D	- 7,134
B	1,482	E	- 3,339
C	- 8,452	F	- 1,681

향을 고려하였으며, 풍하중 압력의 방향 및 크기는 각각 Table 2를 통해 제시하였다. 바람을 받는 면(A)은 유동 정체점 (Stagnation point)이 형성되어 가장 높은 압력이 발생하게 되며, 이후 비닐하우스 지붕(C, D)을 지나며, 지붕 형상에 의해 속도가 빨라지며 부압이 걸려 양력이 발생하게 된다. 이후 비닐하우스 뒤쪽 면(E, F) 면에서는 유동 박리에 따른 역압력 구배가 발생한다.

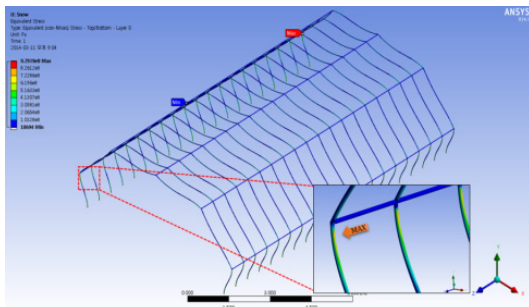
3. 결과 및 분석

3.1 적설하중 해석

Fig. 5은 40 cm의 적설 하중이 비닐하우스 지붕에 가해졌을 때 비닐하우스 응력분포를 나타낸 그림이다. 각 부분의 상대적인 변형 정도를 강조하기 위하여 실제 변위에 대해 5배 확대하여 표시하였다.

서까래 및 도리가 만나는 부분에서의 변위는 파이프의 중간부분에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이는 파이프 교차지점에서 구조 면적이 증가하여 파이프의 중간부분 보다 구조적으로 강성이 보강되기 때문으로 판단된다.

반면, 최대 응력 집중 지점은 비닐하우스의 측고 하단 지지 파이프, 서까래 및 도리의 교차 지점 바로 밑에서 나타난다. 이는 적설하중에 의해 지붕이 전체적으로 내려오면서 고정 조건이 적용된 기단 부 파이프 위쪽으로



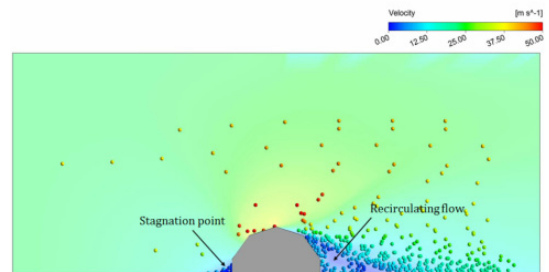
[Fig. 5] Von-mises Stress distribution under snow load condition (snow depth : 40 cm)

이후에 부분에서의 특이점에 대한 응력 집중 현상이 발생하기 때문이며 최대 응력 값은 약 930.4 MPa으로 파이프의 항복 응력 보다 높게 나오지만, 실제로는 파이프가 이난 연결클립이 견뎌야 될 응력이기 때문에 실제 파이프의 변형은 크게 일어나지 않을 것으로 판단된다. 만약 실제 현상에서 연결클립 및 파이프의 변형이 있더라도 필요부위만 교체가 가능하기 때문에 복구가 용이하며, 일반적으로 연결클립의 강성이 파이프 보다 낮기 때문에 파이프 변형 전에 연결클립의 파손이 먼저 일어날 것으로 판단되어 소모성 부품인 연결 클립만 교환해야 될 것으로 예측된다.

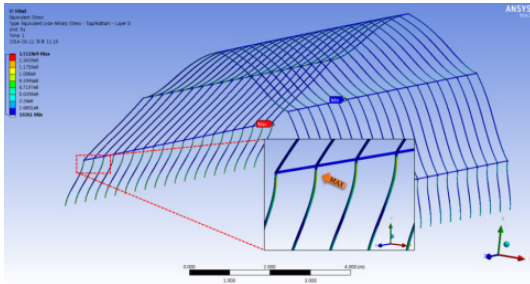
3.2 풍하중 해석

Fig. 6은 풍하중 작용 시 비닐하우스 외부의 유동 분포 및 속도를 나타내고 있으며, Fig. 8은 외부 유동에 따른 비닐하우스 지지 파이프의 응력 분포를 표시하였다. 바람을 직접적으로 받는 비닐하우스의 왼쪽 기단 부에는 유동 정체점이 형성되어 높은 정압이 형성되며 이후 아치의 왼쪽 편을 따라 빠르게 공기가 지나며 초기 속도보다도 높은 약 50 m/s 로 속도가 증가한다. 이후 아치의 왼편에서 비닐 하우스의 높이가 낮아지나 하우스의 지붕 선단에서 유동 박리(Flow separation)가 발생하여 비닐 하우스의 오른쪽 기단 부에는 커다란 재순환 영역이 발생하여(Flow recirculation zone) 역압력 구배가 발생하게 된다.

최대 변위는 비닐하우스의 지붕의 선단 부분으로 초기 지점 대비 약 21.3 cm 가량 상승한다. 이러한 거동의 원인은 비닐하우스의 형상에 의한 공력 특성 상 바람을 받는 면(아치 왼쪽)은 오른쪽으로 밀리고 유동 박리 면(아치 오른쪽)은 동압 증가에 따른 정압 감소로 인해 양력이 발생하여 비닐하우스 구조를 상승시키게 되어 적설 하중 대비 약 2 배의 최대 변위 량을 보여준다.



[Fig. 6] Particle tracking and velocity contour under wind load condition



[Fig. 7] Von-mises stress distribution under wind load condition (velocity : 40 m/s)

반면, 최대 응력 집중 지점은 Fig. 7에서와 같이 비닐하우스의 바람을 받는 면의 기단 부 파이프와 서까래의 접합 지점 바로 밑에서 나타난다. 비닐하우스 지붕 구조의 전체적인 상승과 유동 방향으로의 밀림 현상으로 인해 해당 지점에서 파이프의 응력 집중이 발생하기 때문으로 판단된다. 최대 응력은 약 1,500 MPa로서 적설 하중에 비해 높으며, 최대 하중 발생 위치는 동일한 것으로 해석되어 기단부와 서까래 접합부위의 연결 클립의 강성이 매우 중요한 설계 인자임을 확인하였다.

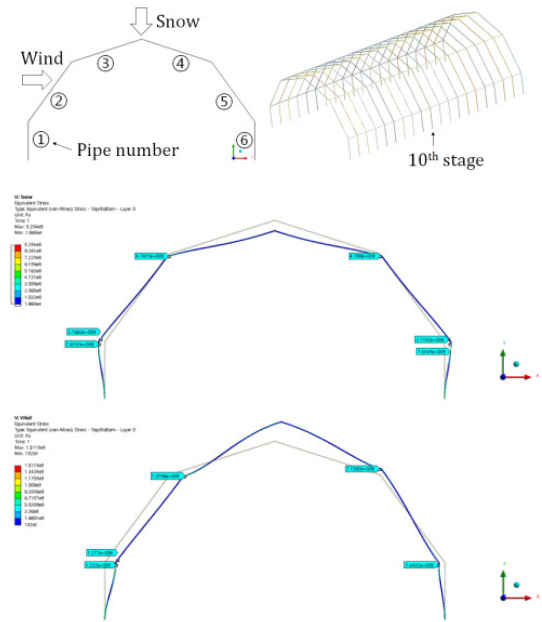
3.3 하중조건 간 구조적 안전성 비교분석

Fig. 8은 비닐하우스의 유지관리 시 파이프 교체 가장 어려울 것으로 예상 되는 비닐하우스의 중간 부분인 10번째 단의 서까래 및 하단 지지 파이프의 적설하중과 풍하중 조건에서의 최대응력 및 발생 지점을 분석하여 구조적 안전성을 정량적으로 비교하였다.

두 하중 조건 모두에서 각 파이프 내 응력이 높은 부위는 각 파이프의 끝단인 클립부가 체결되는 곳에서 발생하게 된다. 이는 구조적으로 여러 파이프가 교차 되는 절점 부분에서 응력 집중이 발생하기 때문이다. 또한 최대 응력 값은 풍하중 해석 결과와 동일하게 중간 단에서도 풍하중이 적설하중에 비해 전체적으로 높게 나타나고 있다.

[Table 3] The maximum stress at each pipe in the 10th stage according to both loads

Pipe No.	Snow load [Pa]	Wind load [Pa]
1	7.65 E+08	1.22 E+08
2	2.77 E+08	1.28 E+08
3	4.73 E+08	1.08 E+08
4	4.73 E+08	7.74 E+08
5	2.77 E+08	3.98 E+08
6	7.62 E+08	7.44 E+08



[Fig. 8] The location of maximum stress at each pipe and junction in the 10th stage (upper : schematics of pipe structure, middle : snow load condition, lower : wind load condition)

Table 3 은 10 번째 단의 총 6 개의 파이프에서의 최대 응력 값을 정리 한 것이며, 가장 큰 응력이 발생하는 위치는 바람의 영향을 가장 많이 받는 하단 지지 파이프이다. 이는 Fig. 7에서와 같이 비닐하우스 구조가 오른쪽으로 밀리면서 클램프 부위가 크게 인장되기 때문이다. 결과적으로 적설하중에 비해 풍하중이 비닐하우스의 구조적 안전성을 더욱 악화시키며, 특히 하단 지지부 클램프 부위에서 큰 응력 집중 현상이 발생함을 추가적으로 확인하였다.

그러나 실제 조립식 비닐하우스에서의 지지 및 연결 파이프들은 직접 연결되지 않으며, 금속 혹은 복합 플라스틱 재질의 클램프에 의해 연결되어 있다. 따라서 앞서 연결 부 절점 부위의 응력이 파이프의 항복 응력 이상 걸리게 되더라도 파이프의 변형 전에 클램프 파단이 먼저 발생할 가능성이 높으며, 이는 비닐하우스의 유지·관리와 같은 경제적 측면에서 파이프의 재사용이 가능하도록 파이프의 변형을 최소화 하면서도, 동시에 클램프의 파단을 최대한 늦출 수 있기 때문에 조립식 비닐하우스 연결 클립 설계를 위해서는 이와 같이 구조해석을 통해 응력 및 변형 특성을 선행적으로 확인하는 것이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 25 평형 비닐하우스를 조립식 육면체 형상으로 구성하여 내재해 규격인 적설 하중 40 cm 및 풍하중 40 m/s에 대해 구조 해석을 수행하여 안정성을 평가하였다.

전반적으로 풍하중이 적설하중에 비해 응력 집중 및 변형이 크게 나타나는 것으로 예측되었으며, 특히 풍하중은 비닐하우스 각 부분 별로 하중 크기 뿐 아니라 하중의 방향이 다르기 때문에 전산 유체기법과 같은 유동현상에 대한 해석 및 분석이 병행되어야 적절한 구조해석 조건을 부여할 수 있음을 확인하였다.

구조안정성 해석 결과 적설 하중 및 풍하중 시 모두 최대 응력의 발생 부분은 실제 비닐하우스에서 하단 지지 파이프와 지붕(아치) 구조를 이루는 서까래가 체결되는 부위에서 발생하였으며, 이 부분은 실제로는 연결 클립으로 조립 되는 부위이므로 연결클립 설계 시 최대 응력 기준으로 설정하여 설계 한다면 재해 상황 시 파손이 일어나지 않는 견고한 클립 제작을 할 수 있을 것으로 사료 된다.

따라서 본 연구결과를 이용하여 조립식 비닐하우스의 연결클립 설계 연구를 수행할 예정 이다.

References

[1] K. P. You, "Evaluation of Snow Load Using a Snow Simulation Wind Tunnel for Single Span and Multiple Span Green House Roofs", Architectural Institute of Korea, Vol. 28, No. 7, pp. 73-80, 2012.

[2] J. Y. Kim, "Damage Status and Countermeasure against Snowfall on Plastics Houses", Korean Society for Horticultural Science, Vol. 19, No. 4, pp. 629-635, 2001.

[3] K. R. Kwon, C. S. Min, Y. H. Kim, "Structural Analysis of Cheju-style Plastic Greenhouse Model for Crop Growing Based on the Wind Load", Journal of bio-environment control, Vol. 7, No. 3, pp. 181-190, 1998.

[4] S. Y. Paek, S. G. Cho, K. P. You, Y. M. Kim, "A Study on the Distribution of Wind Pressure Coefficient in Green House", Architectural Institute of Korea, Vol. 25, No. 8, pp. 87-94, 2009.

[5] S. G. Lee, J. W. Lee, H. W. Lee, "Development of Reinforcement Strategy of One-Span Vinyl House for Reduction of Damage by Heavy Snow", Journal of

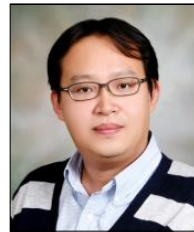
Bio-Environment Control, Vol. 14, No. 2, pp. 131-137, 2005.

[6] J. U. Cho, E. J. Lee, J. S. Nam, "Model Development by Structural Analysis of Vinyl House at Heavy Snow", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 11, No. 8, pp. 2727-2733, 2010.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.8.2727>

노 경 철(Kyoung-Chul Ro)

[정회원]



- 2001년 2월 : 중앙대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2009년 8월 : 중앙대학교 일반대학원 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 2011년 8월 : 중앙대학교 기계공학부 연구교수
- 2011년 9월 ~ 현재 : 동양대학교 철도차량학과 조교수

<관심분야>

유체역학, 열전달, 열류해석