

비닐하우스의 풍하중 구조안전성 검토에 관한 연구

백신원*

A Study on the Structural Safety Analysis for Vinyl House at Wind Load

Shinwon Paik**

Corresponding Author

Shinwon Paik

Tel : +82-31-670-5281

E-mail : paiksw@hknu.ac.kr

Received : May 20, 2019

Revised : August 21, 2019

Accepted : October 8, 2019

Abstract : Vinyl house consists of main rafter, lateral member, clamps and polyethylene film. Many vinyl houses are used to grow fruits, flowers and vegetables in the countryside. Due to climate change, vinyl houses are often destroyed by strong winds or typhoons in summer. Many farmers suffer great economic damage from the collapse of vinyl houses. So it is very important to build a safe vinyl house and find a method to withstand this heavy wind load. In this study, a structural analysis was performed on four types of vinyl houses(10-single-4, 10-single-6, 10-single-7, 10-single-10). In addition, axial force and flexural moment are obtained from the structural analysis of four types of vinyl house. For these four types of vinyl house, structural safety was reviewed by obtaining the combined stress ratio by the strength design method. This structural review showed that the specifications for the vinyl house proposed in the design are not safe. Especially, the result of structural analysis for four types of vinyl house showed that the vinyl house structure constructed as a standard was a very dangerous structure. Therefore, it is necessary to devise diverse methods in order to make vinyl houses structurally safe for heavy wind load in the future. Also a variety of manual development is needed to prevent the collapse of vinyl houses at heavy wind load.

Key Words : vinyl house, axial force, flexural moment, heavy wind load, main rafter

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

비닐하우스는 외부 피복재가 PE, EVA, PVC 등의 플라스틱소재로 되어 있는 온실을 말하며, 온실의 골조는 아연도용융 원형강관, 사각관 등의 철재류, 스프링강인 조리개와 볼트 또는 피스나사못 등 조립재 등으로 구성되어 있다. 비닐하우스는 설치비용이 매우 싸고 쉽게 시공할 수 있어 농가에서 많이 이용하는 농가 시설물로서 유리온실에 비해 광투과성, 보온성, 환경제어, 안전성 등이 다소 떨어지나 겨울철에 난방과 보온을 하여 작물을 재배할 수 있기 때문에 토마토, 오이 등의 과채류(果菜類), 상추, 시금치, 겨울배추 등의 엽채류(葉菜類), 장미, 백합, 국화, 글라디올러스 등의 화훼류(花卉類) 등을 재배하는데 주로 이용되고 있다.

비닐하우스의 종류는 지붕의 형태와 형상에 따라 터널형, 아치형, 지붕형 등으로 분류할 수 있고, 축조 형태에 따라 단동형(單動型)과 연동형(連動型)으로 구분할 수 있는데, 연동형의 경우 1연동형, 2연동형, 3연동형 등으로 구분할 수 있다¹⁾.

비닐하우스는 온실에 비해 매우 적은 비용으로 간단하게 조립하고 설치하여 사용할 수 있는 농가 시설물이나 겨울철 폭설이나 여름철 강풍이나 태풍에 의해 손쉽게 붕괴되는 구조적으로 매우 취약한 구조물이다.

비닐하우스의 기상재해로 인한 정확한 피해액 통계를 파악하는 것은 어려움이 있으나, 1998년부터 2015년까지 연 평균 767억원의 피해액과 20,279 ha(원예시설면적의 40% 수준)의 누적 피해면적을 보였으며, 이중 특히 태풍에 의한 피해는 46.7%를 차지하고 있는 것으

*한경대학교 토목안전환경공학과 교수 (Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University)

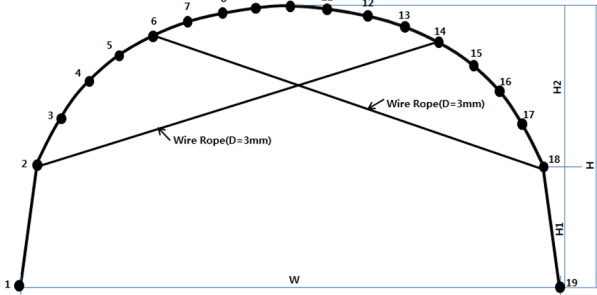


Fig. 1. Vinyl house reinforced with wire rope.

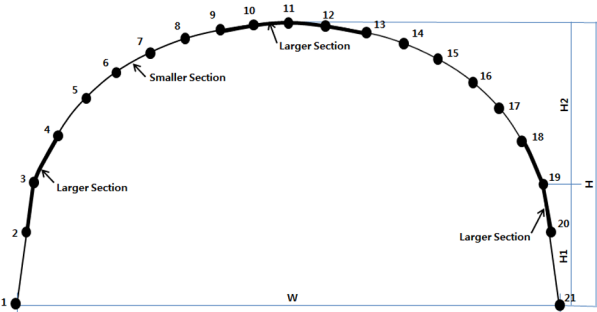


Fig. 2. Vinyl house reinforced with larger diameter.

로 나타났다.

따라서 비닐하우스의 붕괴로 인한 농가의 피해를 경감시키기 위해 2007년 원예특작시설 재해경감대책을 수립하면서 비닐하우스의 주부재인 서까래를 강성이 좋은 SPVH(KS D 3760 일반농업용 아연도금강관)대신에 SPVHS(KS D 3760 구조용 아연도금강관)를 사용하게 함으로써 구조적인 성능을 강화시킨 바 있다¹⁾.

한편 비닐하우스에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았으나, 최근에는 비닐하우스의 주 구조부재인 서까래에 Fig. 1과 같이 로프나 강선으로 수평가새를 설치하여 구조적으로 보강한 연구도 있었으며²⁾, Fig. 2와 같이 비닐하우스의 서까래에서 모멘트가 크게 발생하는 부분을 직경이 큰 단면을 사용함으로써 비닐하우스의 구조적 성능을 향상시킨 연구도 있었고³⁾, 특히 겨울철에 매우 큰 설하중을 받는 비닐하우스의 구조적 안전성 검토를 강도설계법에 의해 분석한 연구도 있었다⁴⁾.

한편, 농림축산식품부에서는 기상재해로 인한 원예특작시설의 경제적 손실 등을 최소화하기 위해 2007년 4월부터 원예특작시설 내재형 기준을 마련하고, 여러 차례 주요 개정을 통해 형식을 추가하거나 구조적 성능을 강화시켜 운영하고 있으나 원예특작시설 내재형 규격 설계도·시방서에서는 강도설계법에 의한 비닐하우스의 풍하중에 대한 구조적 안전성 평가 방법 등이 구체적으로 기술되어 있지 않기 때문에, 본 연구

에서는 단동비닐하우스의 대표적인 형식에 대한 원예특작시설 설계풍속을 적용하여 구조해석을 통해 건설교통부 고시 건축구조기준⁵⁾의 강도설계법에 의한 구조적 안전성 평가함으로써 원예특작시설 설계풍속의 적절성을 평가하고 구조적 안전성을 확보할 수 있는 방안 등을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구에서는 농림축산식품부 고시 원예특작시설 내재해형 규격 설계도·시방서에서 제시하고 있는 단동비닐하우스 19종에 사용되고 있는 구조부재 서까래의 규격(Φ25.4×1.5 t, Φ31.8×1.5 t, Φ31.8×1.7 t, Φ42.2×2.1 t) 중 비닐하우스의 동고가 가장 높으면서 폭이 가장 큰 대표 단동 비닐하우스(10-단동-4, 10-단동-6, 10-단동-7, 10-단동-10) 네 가지 형태의 단동 비닐하우스를 선정하였다. 이 네 가지 형태의 단동 비닐하우스의 규격 및 설계풍속(m/s)은 Table 1과 같다.

한편 여름철에 태풍이 내륙에 상륙하거나 돌풍이 부는 경우 풍하중에 의한 비닐하우스의 붕괴로 인해 농촌에 큰 농작물 피해를 주기 때문에 본 연구에서는 농림축산식품부 고시 원예특작시설 내재해형 규격 설계도·시방서에서 제시하고 있는 대표적인 단동비닐하우스 네 종류에 설계풍속이 작용하는 경우 구조적 안전성을 확보하고 있는지를 강도설계법으로 평가하였다. 이때 Fig. 1과 Fig. 2에서 W 는 단동비닐하우스의 폭, H_1 은 단동비닐하우스의 측고, H_2 는 단동비닐하우스의 동고를 의미한다.

Table 1. Standard vinyl house

Type	Width W (m)	Height		Rafter standard Φ(mm)×t(mm)@cm	Design wind speed (m/s)
		H1 (m)	H2 (m)		
10-Single-4	8.2	1.6	2.3	Φ31.8×1.7t@50	35
10-Single-6	7.6	1.7	2.0	Φ31.8×1.5t@50	39
10-Single-7	8.9	1.7	2.2	Φ42.2×2.1t@90	41
10-Single-10	5.4	1.2	1.4	Φ25.4×1.5t@80	28

3. 풍하중 구조해석

비닐하우스에 작용하는 풍하중의 크기는 건설교통부 고시 건축구조기준(2018)에 따라 계산할 수 있다.

설계지역의 지표면으로부터 높이가 H 인 지점의 설계풍속 V_H 는 기본풍속, 풍속의 고도분포, 지형에 의한 풍속할증, 건축물의 중요도 등을 고려하여 다음 식 [1]로 산정할 수 있다.

$$V_H = V_o \cdot K_{zr} \cdot K_{zt} \cdot I_w \quad [1]$$

여기서, V_H : 임의높이 H 에 대한 설계풍속(m/s)

V_o : 기본풍속(m/s)

K_{zr} : 풍속의 고도분포계수

K_{zt} : 지형에 의한 풍속할증계수

I_w : 건축물의 중요도계수

구조물의 설계를 위한 기본풍속 V_o 는 구조물이 위치한 지역에 따라 다른데, 본 연구에서는 농림축산식품부 고시 원예특작시설 내재해형 규격 설계도·시방서에서 제시하고 있는 단동비닐하우스 10-단동-4, 10-단동-6, 10-단동-7, 10-단동-10 규격에 대한 설계풍속 값인 Table 2의 값을 적용하였다. 풍속은 지표면과의 마찰로 인해 지표면 가까이에서는 감소하고 상공으로 올라갈수록 증가하는 현상을 보이는데 이를 고려한 고도분포계수 K_{zr} 는 지표면조도구분 D 를 적용하여 1.13을 적용하였고, 산의 능선이나 정상, 언덕, 경사지, 절벽 등 국지적인 지형의 영향으로 인한 풍속의 변화를 고려하는 지형에 의한 풍속할증계수 K_{zt} 는 비닐하우스 설치지역이 평탄한 지역으로 보아 1.0을 적용하였으며, 건축물의 중요도계수는 중요도 3으로 분류하여 0.9를 적용하였다.

한편, 설계높이에 대한 설계속도압 q_H 는 다음 식 [2]으로 산정할 수 있다.

$$q_H = \frac{1}{2} \rho V_H^2 \quad [2]$$

여기서, q_H : 기준높이 H 에 대한 설계속도압(N/m^2)

ρ : 공기밀도로서 균일하게 $1.22kg/m^3$ 적용

V_H : 임의높이 H 에 대한 설계풍속(m/s)

또한, 밀폐형 건축물의 주골조설계용 설계풍압 p_F 는 다음 식 [3]으로 산정할 수 있다.

$$p_F = q_H \cdot G_D \cdot C_{pe} \quad [3]$$

여기서, p_F : 주골조설계용 설계풍압(N/m^2)

q_H : 기준높이 H 에 대한 설계속도압(N/m^2)

G_D : 주골조설계용 풍방향 가스트영향계수

C_{pe} : 풍력계수(풍압계수, 외압계수)

본 연구에서는 조순호의 논문⁶⁾에서 제시하고 있는 비닐하우스의 고유진동수 n_o 를 2.916 Hz, 감쇠정수 ζ_f

Table 2. Wind coefficient(C_{pe})

Type	Wind coefficient Front wall	Arch			Back wall
		Front (L/4)	Center (L/2)	Back (L/4)	
10-Single-4	0.90	-0.36	-1.29	-0.5	-0.5
10-Single-6	0.90	-0.45	-1.28	-0.5	-0.5
10-Single-7	0.90	-0.46	-1.23	-0.5	-0.5
10-Single-10	0.97	-0.46	-1.27	-0.5	-0.5

를 2.71% 적용하여 주골조설계용 풍방향 가스트영향계수 G_D 를 구한 2.13을 적용하였다.

또한, 일반적으로 풍력계수 C_{pe} 는 건축구조기준(2018)의 외압계수를 사용하는데, 단동비닐하우스의 경우 수직부인 측벽과 중앙부의 아치부로 구성되어 있기 때문에 단동비닐하우스 풍력계수 C_{pe} 는 비닐하우스의 곡면높이대 폭비와 수직높이에 따라 풍상벽, 풍상면 1/4부분, 중앙부 1/2부분, 풍하면 1/4부분, 풍하벽으로 나누어 적용하는데, 본 연구에서 고려하고자 하는 네 가지 종류에 대한 풍력계수를 정리한 표가 Table 2이다.

따라서, 각 단동비닐하우스 규격에 따른 Fig. 3에 표시된 풍상벽, 풍상면 1/4부분, 중앙부 1/2부분, 풍하면 1/4부분, 풍하벽에 작용하는 극한 분포풍하중은 [1], [2], [3]식과 Table 1의 간격, Table 2의 풍력계수, 풍하중계수 1.3을 적용하여 구할 수 있는데, 이를 정리한 표가 Table 3이다.

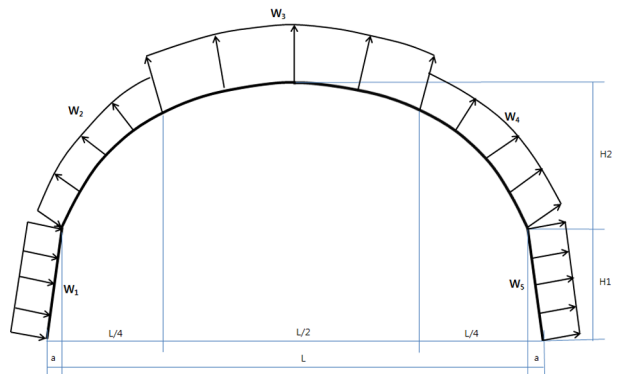


Fig. 3. Wind load distribution of vinyl house.

Table 3. Ultimate uniform wind load(N/m)

Type	Uniform wind load	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
10-Single-4		963	385	1380	535	535
10-Single-6		1196	598	1701	664	664
10-Single-7		2379	1216	3251	1322	1322
10-Single-10		1063	504	1392	548	548

4. 결과 및 분석

본 연구에서는 비닐하우스의 주 부재인 서까래의 아치부분을 16개의 요소(Element)로 횡방향으로 등간격으로 나누어 Fig. 4와 같이 절점번호(Node number)를 부여하여 10-단동-4, 10-단동-6, 10-단동-7, 10-단동-10 네 가지 형태에 대해 구조해석을 수행하였는데, 이 때 사하중계수 0.9는 해석프로그램의 자중을 고려하는 데이터에 입력하여 수행하였다. Fig. 5는 각 비닐하우스 규격의 축력분포를 나타내는 그림으로 풍하중에 의해 발생하는 인장력은 중앙점에서 약간 적게 나타나고 거의 일정한 값을 보임을 알 수 있다. Fig. 6은 각 비닐하우스 규격의 모멘트분포를 나타내는 그림으로 풍하중에

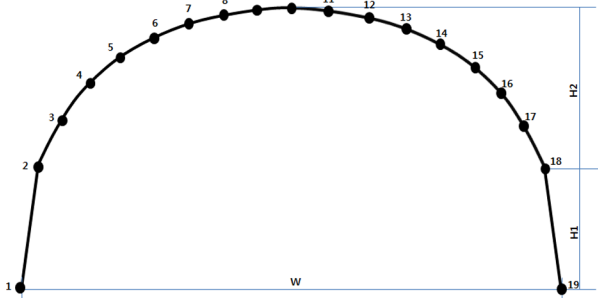


Fig. 4. Node numbers of vinyl house.

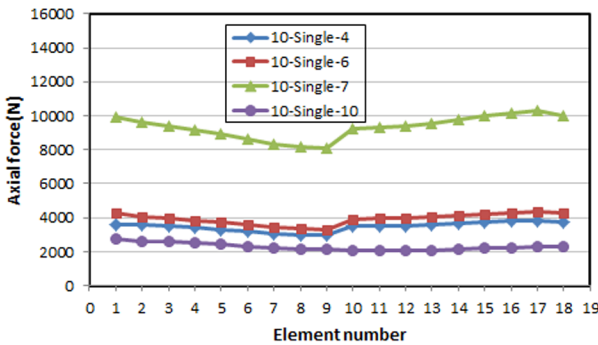


Fig. 5. Axial force distribution.

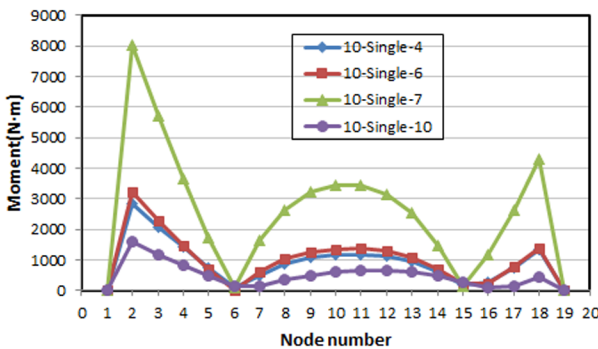


Fig. 6. Moment distribution.

Table 4. Structural analysis results

Type	Analysis results	Axial force, P_{tu} (N)	Moment, M_u (N · m)
10-Single-4		3629.7	2825.5
10-Single-6		4292.6	3211.0
10-Single-7		9948.4	8016.8
10-Single-10		2734.9	1577.5

의해 발생하는 모멘트는 비닐하우스의 풍상향 수직부에서 아치가 시작되는 점에서 가장 크게 발생함을 알 수 있다.

이러한 해석결과를 바탕으로 10-단동-4, 10-단동-6, 10-단동-7, 10-단동-10 네 가지 형태에 대한 풍상향 수직부에서 아치가 시작되는 점에서의 최대 인장력 및 모멘트를 정리한 표가 Table 4와 같다.

건축구조기준(2018)에서는 인장력과 휨을 동시에 받는 2축 대칭단면이고 $\frac{P_{tu}}{\phi_t P_n} < 0.2$ 인 경우, 조합강도비 (R)는 인장강도와 휨강도를 고려하여 다음 식 [4]로 구할 수 있고, 조합강도비가 1.0이상은 설계조건을 만족하지 못하는 구조물로 볼 수 있다.

$$R = \frac{P_{tu}}{2\phi_t P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \quad [4]$$

- 여기서, P_{tu} : 소요극한인장강도(N)
- P_n : 공칭인장강도(N)
- M_u : 소요극한휨모멘트(N · m)
- M_n : 공칭소성휨모멘트(N · m)
- ϕ_t : 인장강도감소계수(=0.90)
- ϕ_b : 휨강도감소계수(=0.90)

농림축산식품부 고시 원예특작시설 내재해형 규격 설계도 · 시방서에서 비닐하우스의 주부재인 서까래는 항복강도가 $F_y = 295MPa$ 이상인 구조용 SPHVS(인장강도 $400MPa$ 이상, 항복강도 $295MPa$ 이상, 연신율 18% 이상) 또는 SPHVS-AZ(인장강도 $400MPa$ 이상, 항복강도 $295MPa$ 이상, 연신율 18% 이상)를 사용하도록 되어 있어, Table 5는 각 비닐하우스에 사용된 서까래는 항복강도를 $F_y = 295MPa$ 로 보고, 10-단동-4, 10-단동-6, 10-단동-7, 10-단동-10 네 가지 형태의 단면성능을 고려하여 공칭휨강도 P_n 과 공칭소성휨모멘트 M_n 을 구하였다. 이때 공칭소성휨모멘트 M_n 은 일반단면계수가 아닌 소성단면계수 Z 를 사용하였다. 따라서 풍하중에 의한 설계조건을 만족하는지를 알아 볼 수 있는 조합

Table 5. Nominal strength

Type	Nominal strength	Axial force, P_n (N)	Moment, M_n (N · m)
10-Single-4		47424.2	454.8
10-Single-6		42123.1	406.6
10-Single-7		78042.3	997.1
10-Single-10		33225.9	253.1

Table 6. Combined strength ratio

Type	Combined strength ratio	Combined strength ratio (R)
10-Single-4		6.95
10-Single-6		8.83
10-Single-7		9.00
10-Single-10		6.97

강도비 R 은 구조해석을 통해 얻어진 Table 4의 소요극한인장강도 P_{tu} , 소요극한휨모멘트 M_u 와 비닐하우스에 사용된 서까래의 재질 및 단면성능으로부터 구해진 Table 5의 공칭휨강도 P_n 과 공칭소성휨모멘트 M_n 을 식 [4]에 대입하여 구할 수 있으며, Table 6은 이를 나타낸 표이다.

Table 5에서 보는 바와 같이 본 연구에서 고려한 10-단동-4, 10-단동-6, 10-단동-7, 10-단동-10 규격 모두에서 1.0보다 매우 큰 값을 보여 농림축산식품부 고시 원예 특작시설 내재해형 규격 설계도·시방서에서 제시하고 있는 단동비닐하우스는 풍하중에 매우 취약한 구조물임을 알 수 있다. 다만 설계풍속을 견딜 수 있는 단동비닐하우스 구조물이 되기 위해서는 서까래의 간격을 조밀하게 하거나 직경과 두께가 큰 단면성능을 가진 서까래를 사용하는 것을 고려할 수 있으나 경제적인 이유를 생각하면 내재해형 규격을 쉽게 개정할 수도 없기 때문에 다른 방안들을 고려할 필요가 있다.

한편 풍하중에 견딜 수 있는 견고한 단동비닐하우스를 제시하는 경우 Table 5에서도 보는 바와 같이 7~9배 이상 비용이 증가할 수 있기 때문에 비닐하우스에 설계풍속이 작용하더라도 비닐하우스의 서까래 및 가로대는 파괴되지 않고 비닐이 설계풍속을 견디지 못하고 먼저 파괴되도록 허용하고 있는 것으로 사료된다.

5. 결론

비닐하우스는 적은 비용으로 간단하게 설치할 수 있는 농가건축물로서 채소류 및 과일 등을 적기에 출하를 목적으로 주로 농가에서 많이 사용하고 있다. 그러

나 주로 여름철에 강풍이나 태풍이 불어오는 경우 많은 비닐하우스가 파손되거나 붕괴되어 농가에 커다란 재산상 손실을 초래하고 있다.

따라서 본 연구에서는 단동비닐하우스 19종 중 대표적인 단면성능을 가진 10-단동-4, 10-단동-6, 10-단동-7, 10-단동-10 네 가지 규격에 대한 구조해석을 통해 단동비닐하우스의 강도설계법에 의한 구조적 안전성을 검토하였는데, 이를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 10-단동-4, 10-단동-6, 10-단동-7, 10-단동-10 네 가지 형태의 단동 비닐하우스에 대해 구조해석 결과, 인장력은 중앙점에서 약간 적게 나타났고 나머지 모든 부분에서 거의 일정한 값을 보였으며, 모멘트는 비닐하우스의 풍상향 수직부에서 아치가 시작되는 점에서 가장 크게 발생함을 알 수 있었다. 따라서 비닐하우스가 풍하중에 견고한 구조가 되기 위해서는 서까래 양 끝단의 매설깊이를 깊게 하고 내재해형 조리기 설치를 견고하게 해야 하고 모멘트가 크게 발생하는 수직부에서 아치가 시작되는 점을 보강할 필요가 있을 것이다.

2. 10-단동-4, 10-단동-6, 10-단동-7, 10-단동-10 네 가지 형태의 단동 비닐하우스에 대해 구조해석을 하고 강도설계법의 조합강도비에 의한 안전성 검토를 한 결과, 구조적으로 안전성을 크게 확보하고 있지 않은 것으로 나타났는데, 이는 강풍이나 태풍이 오는 경우 비닐하우스의 경제적인 이유로 인해 강한 풍하중을 비닐하우스를 덮고 있는 비닐이 먼저 파괴되도록 허용하여 매우 큰 풍하중이 비닐하우스 서까래에 직접적으로 전달되지 않도록 고려한 것으로 생각된다.

따라서 본 연구결과를 종합해 보면 여름철 돌풍이 불거나 태풍이 불어오는 경우 풍하중에 의한 비닐하우스의 붕괴사고를 미연에 방지하기 위해서는 다양한 방안들을 고안할 필요가 있는데, 비용을 증가시키지 않는 방안 중에 일기예보를 참고하여 태풍이나 돌풍이 불어 올 경우에는 풍하중의 반사면적을 줄이기 위해 비닐을 철거했다가 태풍이나 돌풍이 지나간 후 다시 설치하는 매뉴얼을 제작하여 홍보하는 것도 하나의 대안이 될 것으로 사료된다.

References

1) H. J. Jung, S. H. Yang and T. H. Lee, “A Study on the Improvement of Greenhouse Frame to Bear the Heavy Snow”, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 16, No. 3, pp. 2242-2248, 2015.

- 2) K. C. Ro, "An Evaluation of the Structural Stability of a Clip Type Prefabricated Greenhouse under Strong Wind and Heavy Snow Conditions", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.15, No.6, pp.3423-3428, 2014.
- 3) D. J. Jung and C. Teng, "Effect of Wire Bracing to Snow Load Acting on Vinyl House Frame", Journal of the Korea Rural Building Institute, Vol. 12, No. 3, pp. 27-34, 2010.
- 4) S. W. Paik, "A Study on the Structural Safety Analysis for Vinyl House at Snow Load", J. Korean Soc. Saf., Vol. 34, No. 3, pp. 34-39, 2019.
- 5) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Architectural Design Specification", 2018.
- 6) S. H. Cho, "Estimation of Modal Parameter for Plastic Film-Covered Greenhouse Arches", Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 14, No. 2, pp. 67-74, 2010.