공기주입 이중피복 플라스틱온실의 공기주입장치 설계를 위한 기초실험

Fundamental Experiments for Design of Air Inflating Apparatus of Air-Inflated Double-Layer Plastic Greenhouse

이현우^{*,†} · 남효석^{*} · 심상연^{**} · 남상운^{***} · 김영식^{****}

Lee, H.W.^{*,†} · Nam, H.S.^{*} · Sim, S.Y.^{**} · Nam, S.W.^{***} · Kim, Y.S.^{****}

ABSTRACT

This study was conducted to provide fundamental data for design of air inflating apparatus of air-inflated double-layer plastic greenhouse. The variation of static pressure in air tube for different fans and filters, filtering performance for various kinds of filters and destruction phase of experimental greenhouse collapsed by excessive static pressure in air space were analyzed. The general type of forward centrifugal fan was recommended for inflating air space in air-inflated double-layer plastic greenhouse. The experimental greenhouse was collapsed down by excessive static pressure just like fallen by heavy snow load acting on it. The static pressure in air tube without filter decreased linearly as the number of outlet openings increased. But the pressure in air tube with filter declined quadratically, the decremental ratio diminished by the increase of outlet openings. The higher filtering efficiency and the greater decrements of static pressure in air tube, the larger capacity fan was required for maintaining proper static pressure in air space. Because the porosities of filter were blocked by dust as time goes by, the static pressure in air tube with filter decreased. The higher filtering efficiency, the less decremental ratio of static pressure in air tube as time passes by. Considering the filtering efficiency, decrement of static pressure and thickness of filter, the 5mm thickness filter of 75% efficiency was recommended for air inflating filter of air-inflated double-layer plastic greenhouse.

Keywords: Air space; fan; filter; filtering efficiency; static pressure

I. 서 론

현재 우리나라에 설치되어 있는 플라스틱온실은 대부분 일중 피복이거나 이중피복 방식이더라도 두 피복층 사이의 공기층이 밀폐되어 있지 않다. 이러한 피복방식은 기밀성이 떨어져 환기 전열 손실이 많고 피복재를 통한 관류전열손실도 상당히 많기 때문에 보온성이 낮아 겨울철 난방에너지의 사용량이 증가되는

문제점을 갖고 있다. 또한 겨울철에 이중피복 사이의 낮은 공기온도 때문에 대류에 의한 열손실로 인해 내부피복재의 온도가 낮아지고 결로의 발생이 많아지게 되어 광투과율이 현저히 떨어지는 단점을 가지고 있다. 따라서 난방에너지를 절감할 수 있을 뿐만 아니라 결로도 경감시킬 수 있는 새로운 형태의 이중피복방식이 도입될 필요가 있다.

공기주입 이중피복 방식은 기밀성이 높기 때문에 환기전열량이 적고 관류전열량도 상당히 줄어들어 일중피복에 비해 난방열량을 약 40 % 정도까지 절감할 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 공기층이 단열층의 역할을 하여 내부피복재와 외부의 찬 공기와의 접촉이 차단되기 때문에 결로도 경감시킬 수 있다. 이외에도 공기주입 이중피복의 우수한 점으로는 시공비가 비교적 저렴하고, 피복재 교체 이외에는 별다른 관리가 필요 없으며, 적설하중과 풍하중에 대하여 구조적으로 안전성이 높아진다는 점 등이 있다 (Boodley, 1996; Both, 2004; Fang, 2004; Fang

* 경북대학교 농업생명과학대학 농업토목공학과

** 경기도농업기술원 원예연구과

*** 충남대학교 농업생명과학대학 생물자원공학과

**** 상명대학교 식물산업공학과

† Corresponding author. Tel.: +82-53-950-5736

Fax: +82-53-950-6752

E-mail address: whlee@knu.ac.kr

2009년 8월 6일 투고

2009년 8월 25일 심사완료

2009년 9월 22일 게재확정

et al., 2007; Jensen, 2004). 따라서 이러한 장점을 가진 공기주입 이중피복 플라스틱온실을 우리나라의 기상조건에 적합한 구조형태로 개발할 필요가 있을 것으로 판단된다.

공기주입 이중피복 플라스틱온실에서 가장 중요한 장치는 이중피복층에 공기를 주입하는 주입시스템이라 할 수 있다. 이중피복의 밀폐가 완전하지 못하기 때문에 적정 두께의 공기층을 유지하기 위해서는 일정 압력과 풍량을 가진 송풍기를 이용하여 공기를 주입할 필요가 있다 (Aldrich et al., 1989; Mears et al., 1976; Nelson et al., 1991; Roberts et al., 1972). 또한, 외부공기가 유입됨에 따라 먼지가 혼합될 가능성이 있으며 장기간에 걸쳐 유입될 경우 피복층 내부를 오염시켜 광투과율을 크게 저하시킬 우려가 있기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 공기 유입부에 필터를 설치하여 먼지의 유입을 차단할 필요가 있다. 그러나 필터를 설치할 경우 송풍압력을 떨어뜨려 공기층 내부의 압력이 저하되게 된다. 따라서 공기주입 이중피복 온실에 적합한 송풍기의 종류와 용량 및 공기필터의 종류를 구명할 필요가 있다. 본 연구는 공기주입 이중피복 온실에 설치할 공기주입장치의 설계를 위한 기초자료를 제공하기 위하여 송풍기 및 먼지제거 필터의 종류에 따른 공기층 내부의 정압변화, 필터의 종류에 따른 먼지제거 효과 및 공기층의 정압에 의한 온실의 파괴양상을 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 공기층내의 정압변화 실험

팬용량 및 필터설치에 따른 피복층 내부의 정압변화를 분석하기 위한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 송풍팬, 공기튜브, 유출구 및 정압측정기로 구성되어 있다. 유출구는 직경이 14.5 mm인 구멍 8개를 뚫어 공기층의 정압크기를 조절하도록 하였다.

Table 1은 이중피복온실에 적합한 송풍기의 종류를 구명하기 위하여 사용한 4가지 전향원심 송풍기의 특성을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)와 같은 일반용인 FAN-1과 FAN-2는 Fig 2(b)의 버너용인 FAN-3과 FAN-4에 비해 상대적으로 압력은 낮고 풍량은 많은 형태의 송풍기이다.

2. 공기주입 이중피복온실 붕괴실험

Fig. 3은 온실에 이중피복을 설치하고 이중피복층에 공기를 주입하였을 때 온실구조에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험온실이다. 송풍량에 비해 상대적으로 송풍압이 큰 형태인 Table 1의 FAN-4 송풍기를 사용하여 송풍하였으며, 그에 따른 온실 구조의 붕괴양상을 분석하였다.

Fig. 1 Experimental apparatus for analyzing variation of static pressure in air tube

Table 1 Characteristics of experimental fans

Characteristic \ Fan type	General fan		Fan for burner	
	FAN-1	FAN-2	FAN-3	FAN-4
Outlet area (m ²)	0.0020	0.0045	0.0011	0.0017
Air flow (m ³ /min)	1.7	4.1	1.5	3.3
Pressure (mmAq)	11.0	26.0	33.0	66.0

(a) General fan

(b) Fan for burner

Fig. 2 Types of forward centrifugal fans for experiment

Fig. 3 Experimental air-inflated double layer plastic greenhouse

3. 필터의 종류에 따른 정압변화 실험

이중피복층 내에 먼지가 유입되는 것을 억제할 목적으로 필

Fig. 4 Types of filters

Table 2 Filtering efficiencies and thicknesses of filters

Type	Filtering efficiency (%)	Thickness (mm)
A	70	3
B	75	5
C	80	10
D	82	15

Fig. 5 Experimental apparatus for filtering off dust

터의 집진효율에 따른 먼지제거 효과를 분석하기 위하여 Fig. 4 및 Table 2와 같이 시중에서 사용되고 있는 4가지 종류의 필터를 사용하여 실험을 실시하였다. 실험은 Fig. 1의 실험장치를 이용하였고, 송풍팬은 Table 1의 Fan-1을 사용하였으며, 송풍팬의 유입부에 필터를 설치하여 필터의 종류별로 개구부의 수에 따른 공기층의 정압변화를 분석하였다.

4. 먼지제거 성능 실험

Fig. 5는 송풍기 유입구에 먼지제거용 필터를 설치하여 먼지 제거 효과를 분석하기 위한 실험장치이다. 송풍기의 송풍량은 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ 이다. 필터는 70, 75, 80 % 효율의 세 가지 종류를 사용하였고, 필터를 설치한 각각의 경우에 대하여 유출공을 2개, 1개, 1개씩을 열어 공기층 내부의 초기정압을 10 mmAq에 근접하도록 설정하였다. 시간이 경과함에 따라 먼지로 인해 변화하는 공기층 내부의 정압변화를 분석하여 먼지제거 성능을 분석하였다.

Fig. 6 Variation of static pressure along number of outlet openings in air tube

Fig. 7 Static pressure for each fan type in air tube with closed outlet openings

III. 결과 및 고찰

1. 송풍기 종류별 공기층의 정압 변화

Fig. 6은 4가지 종류의 송풍기에 대하여 유출 개구부의 수에 따른 공기층의 정압변화를 도시한 것이다. FAN-4의 초기압력이 증가하는 부분은 정압이 너무 커서 역류가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 전체적으로 송풍기의 송풍압이 클수록 개구부 면적에 따른 정압의 감소율이 더 큰 것으로 나타났다. 또한, 개구부의 수가 증가하여 공기유출부의 면적이 늘어날수록 정압이 감소하였다. 이러한 개구부수의 증가에 따른 정압의 감소는 송풍기의 효율을 떨어지게 하기 때문에 실제 온실에서는 밀폐도를 높여 개구부의 면적을 줄일 필요가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 유출 개구부를 모두 막았을 때 3가지 종류의 송풍기에 대한 공기층의 정압을 비교한 것이다. 일반용인 FAN-2와

Fig. 8 Appearance of experimental greenhouse collapsed by excessive static pressure in air space

버너용인 FAN-3의 경우 풍량이 각각 $4.1 \text{ m}^3/\text{min}$ 과 $1.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 로 큰 차이가 있음에도 불구하고 공기층내의 정압은 거의 같은 값이 발생하였고, FAN-1의 풍량은 $1.7 \text{ m}^3/\text{min}$ 로 FAN-3의 $1.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 보다 비록 더 크지만 정압은 오히려 훨씬 낮게 나타났다. Roberts and Mears (1969)는 이중피복 온실에 사용할 공기주입 송풍기로 공기층의 최대정압을 약 13 mmAq 정도로 유지시킬 수 있고 이중피복의 연결부 틈새로 빠져나가는 풍량을 보충해 줄 수 있는 정도의 송풍기를 추천하고 있다. 따라서 낮은 압력으로 많은 풍량을 공급할 수 있는 FAN-1과 FAN-2와 같은 일반용 전향원심송풍기를 공기주입팬으로 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

2. 온실의 붕괴 양상

Fig. 8은 송풍량에 비해 상대적으로 송풍압이 큰 형태인 FAN-4 송풍기를 사용하여 송풍하였을 때 공기층 내부의 과다한 정압에 의해 온실이 붕괴된 양상을 보여주고 있다. 온실 외부에 과다한 적설이 쌓였을 때 적설하중에 의하여 온실이 파괴되는 전형적인 파괴양상과 동일한 형태로 파괴됨을 알 수 있었다. 이는 밀폐된 온실내부의 대기압이 외부보다 낮아 온실의 이중피복 공기층 내부의 정압이 증가함에 따라 온실의 외부보다 압력이 낮은 온실의 안쪽으로 압력이 작용하여 적설하중이 작용하는 경우와 같은 효과가 나타나게 되어 그림과 같이 적설하중에 의한 파괴양상처럼 아래쪽, 즉 온실 안쪽으로 붕괴하게 된 것으로 판단된다. 따라서 온실이 붕괴하지 않고 이중피복의 공기층 내부의 정압을 적절하게 유지하여 공기층의 단열효과를 극대화 할 수 있는 적정 송풍압의 규명이 필요할 것으로 판단된다.

3. 유출 개구부 면적에 따른 필터종류별 공기층의 정압 변화

Fig. 9는 유출 개구부의 수에 따른 집진효율별 공기층의 정압변화를 나타낸 것이다. 필터를 설치하지 않았을 때 개구부의 수가 증가함에 따라 정압이 직선적으로 감소함을 알 수 있었

Fig. 9 Variation of static pressure along number of outlet openings for different filtering efficiencies

Table 3 Correlation between static pressure and outlet area for different filtering efficiencies

Filtering efficiency (%)	Correlation curve	Correlation coefficient
70	$0.096x^2 - 2.467x + 18.12$	0.999
75	$0.158x^2 - 3.074x + 17.48$	0.999
80	$0.162x^2 - 3.089x + 17.09$	0.999
82	$0.165x^2 - 3.071x + 16.35$	0.998

다. 반면에 필터를 설치하였을 때에는 개구부의 수가 증가함에 따라 곡선 모양으로 감소하여 정압의 감소율이 작아지는 것으로 나타났다. Table 3은 개구부의 수와 정압과의 상관관계를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 상관식은 2차식으로 잘 나타낼 수 있으며, 필터효율이 클수록 정압의 감소율이 더 작아지는 것으로 나타났다.

4. 필터의 집진효율별 공기층의 정압 감소량

Fig. 10은 필터의 집진효율별로 필터를 설치하지 않았을 때에 비해 감소된 정압을 나타낸 것이다. 집진효율이 높은 필터일수록 정압이 더 많이 감소하므로 일정한 압력을 유지하기 위해서는 더 큰 용량의 송풍기가 요구된다. 따라서 필터를 결정할 때에는 필터효율과 전기료에 따른 경제성을 동시에 고려하여 결정할 필요가 있다. 이러한 정압감소량의 자료는 필터의 종류와 공기층의 적정압력을 유지하는데 요구되는 송풍기의 용량을 결정하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

5. 필터의 집진효율별 먼지제거 성능

필터를 설치하지 않은 경우에는 공기층 내에 먼지와 벌레 등이 많이 유입된 것을 가시적으로 확인할 수 있었으며, 이러한 먼지의 유입은 공기층을 오염시켜 온실의 광투과율을 저하시키는 요인이 될 것이다. 따라서 공기유입장치에는 필터가 반드시

Fig. 10 Decrements of static pressure in air tube for different filtering efficiencies

Fig. 11 Variation of static pressure in air tube along length of time for different filtering efficiencies

설치되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 11은 필터의 집진효율별로 시간이 경과함에 따른 공기층 내부의 정압변화를 도시한 것이다. 3가지 종류의 필터에 대한 초기정압이 다소 차이가 있는 것은 동일한 크기의 공기층과 송풍량의 조건에서 유출 개구부의 수를 달리하여 공기층의 정압을 조절했기 때문이다. 3가지 종류의 필터 모두 시간이 경과함에 따라 공기층의 정압이 감소하였다. 이는 시간이 경과함에 따라 필터를 통과하는 먼지가 필터의 공극을 막게 되어 점점 공극이 줄어들게 되고 그에 따라 정압이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 필터의 효율이 높을수록 시간의 경과에 따른 공기층의 정압 감소율이 작아지는 것으로 나타났다. 이는 필터효율이 높을수록, 즉 두께가 두꺼울수록 기존의 공극이 적기 때문에 시간이 경과함에 따라 먼지에 의해 막혀 정압을 감소시키는 공극이 그만큼 상대적으로 줄어드는 것을 의미한다. 먼지제거 효과, 정압감소량, 필터의 두께 등을 전반적으로 고려해 볼 때 두께가 5 mm인 75 % 효율의 필터가 공기유입장치용 필터로 가장 적합한 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 공기주입 이중피복 온실의 공기주입장치 설계를

위한 기초자료를 제공하기 위하여 송풍기 및 먼지제거 필터의 종류에 따른 공기층 내부의 정압변화 분석, 필터의 종류에 따른 먼지제거 효과 분석 및 공기층의 정압으로 인한 온실의 파괴양상을 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

송풍기의 송풍압이 클수록 개구부 면적에 따른 정압의 감소율이 더 큰 것으로 나타났다. 또한, 개구부의 수가 증가하여 공기유출부의 면적이 늘어날수록 정압이 감소하였다. 이러한 개구부 면적의 증가에 따른 정압의 감소는 송풍기의 효율을 떨어지게 하기 때문에 실제 온실에서는 밀폐도를 높여 개구부의 면적을 줄일 필요가 있을 것으로 판단된다. 공기주입 이중피복온실의 공기주입팬은 낮은 압력으로 많은 풍량을 공급할 수 있는 일반용 전향원심송풍기를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

밀폐된 온실에서 이중피복 공기층의 정압이 증가함에 따라 적설하중이 작용하는 경우와 같은 양상으로 온실이 파괴되었다. 따라서 온실이 파괴되지 않고 이중피복의 공기층 내부의 정압을 적절하게 유지하여 공기층의 단열효과를 극대화 할 수 있는 적정 송풍압의 규명이 필요할 것으로 판단된다.

필터를 설치하지 않았을 때 개구부의 수가 증가함에 따라 정압이 직선적으로 감소함을 알 수 있었다. 반면에 필터를 설치하였을 때에는 개구부의 수가 증가함에 따라 곡선 모양으로 감소하여 정압의 감소율이 작아지는 것으로 나타났다.

집진효율이 높을수록 정압감소량이 큰 것으로 나타났다. 집진효율이 높은 필터일수록 정압이 더 많이 감소하므로 일정한 압력을 유지하기 위해서는 더 큰 용량의 송풍기가 요구됨을 알 수 있었다. 이러한 정압감소량의 자료는 필터의 종류와 공기층의 적정압력을 유지하는데 요구되는 송풍기의 용량을 결정하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다

시간이 경과함에 따라 필터를 설치한 공기층의 정압은 감소하였으며, 이는 시간이 경과함에 따라 필터를 통과하는 먼지가 필터의 공극을 막게 되어 점점 공극이 줄어들게 되고 그에 따라 정압이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 필터의 효율이 높을수록 시간의 경과에 따른 공기층의 정압 감소율이 작아지는 것으로 나타났으며, 이는 필터효율이 높을수록 즉 두께가 두꺼울수록 기존의 공극이 적기 때문에 시간이 경과함에 따라 먼지에 의해 막혀 정압을 감소시키는 공극이 그만큼 상대적으로 줄어드는 것을 의미한다. 먼지제거 효과, 정압감소량, 필터의 두께 등을 전반적으로 고려해 볼 때 두께가 5 mm인 75 % 효율의 필터가 공기유입장치용 필터로 가장 적합한 것으로 판단된다.

본 연구는 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

REFERENCES

1. Aldrich, R. A. and J. W. Bartok, 1989. *Greenhouse engineering*. 2nd ed. Cornell University, Ithaca, New York: Northeast regional agricultural engineering service.
2. Boodley, J. W., 1996. *The commercial greenhouse*. 2nd ed. Albany, New York: Delmar Publishers.
3. Both, A. J., 2004. First air-inflated double-layer polyethylene greenhouse becomes ASAE historic landmark, *ASAE Historical Landmark Dedication*. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, USA.
4. Fang, W., 2004. Double layer poly in Taiwan and its potential applications, *ASAE Historical Landmark Dedication*. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, USA.
5. Fang, W., D. Mears, and A.J. Both, 2007. Story of air-inflated double-layer polyethylene greenhouse and its recent applications in Taiwan. *ASAE International Seminar on Agricultural Structures and Agricultural Engineering*, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, R.O.C..
6. Jensen, M., 2004. The world-wide impact of double-poly greenhouses. *ASAE Historical Landmark Dedication*. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, USA.
7. Mears, D. R., M. K. Kim, and W. J. Roberts. 1976. Structural analysis of an experimental cable supported air-inflated greenhouse. *Transactions of the ASAE* 19(5): 915-919.
8. Nelson, P. V., 1991. *Greenhouse operation and management*. 4th ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
9. Roberts, W. J. and D. R. Mears, 1969. Double covering a film greenhouse using air to separate film layers. *Transactions of the ASAE* 12(1): 32-38.
10. Roberts, W. J., M. K. Kim, and D. R. Mears, 1972. Air inflated and air supported greenhouses. *ASAE Paper No. 72-404*. St. Joseph, Michigan: ASAE.