

FAO Frost Protection

과수 저온피해 방지 기술 리뷰

2020. 2.

최근 이상기상에 따른 과수의 저온·서리피해 발생이 상시화되고 있으나 이를 방지하기 위한 만족할 만한 기술은 부족한 상황임.

따라서 국내외에서 사용하고 있는 몇 가지 관련 기술을 리뷰해 보고 이를 통해 현장 활용성 제고는 물론 효과적인 저온·서리피해 방지에 도움을 주고자 본 자료를 작성함.

요 약

□ 과수 저온피해를 방지하는 기술은 크게 6가지로 구분

- ① 냉기정체 회피 ② 관수(열전도율 향상) ③ 피복작물 제거
- ④ 방상팬 활용 ⑤ 난방기 활용 ⑥ 미세살수 활용

※ ‘연막’ 활용방법은 큰 효과가 없어 권장하지 않고 있음

□ 상기 방법은 시설 유무에 따라 구분 가능하며, 상황에 맞게 적용

- (시설 有) 방상팬 / 난방기 / 미세살수

* 국비·자체사업 등 확대보급 중이나 한정된 예산으로 전 농가 활용 애로

- (시설 無) 냉기정체 회피 / 관수(열전도율 향상) / 피복작물 제거

* 서리 상승지 피해경감이 가능하도록 정보제공 및 현장지도 강화 필요

□ 이상기상 상시화에 대응한 실용적인 대응 방법 강구 필요

- 방상팬은 도입비용이 높고, 역전현상이 크지 않은 경우 효과 미비
- 미세살수는 특히 산간지 과원에서의 물부족으로 한계점 존재하며, 사용방법 미숙지 시 오히려 역피해 우려 상존

- 연소법의 경우 비용이 저렴하고 긴급 대응책으로 활용 가능하나 노동력 소요가 크고 화재 위험성 등이 존재

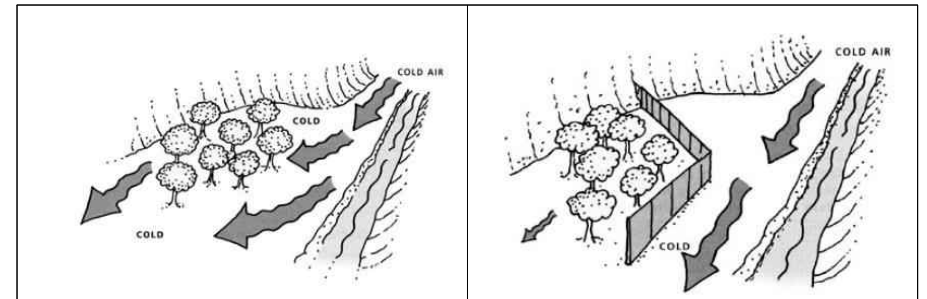
⇒ 전 과원에서 제한적 요소(물부족 등)가 크지 않고 낮은 비용으로도 안정적인 열원(熱源) 공급 등 효과적으로 서리·저온 극복이 가능한 표준형 타입 적용방안 개발·보급 필요

※ 관련 전문가 아이디어 공유 및 과제 협업 등 표준형 도출 계획

1. 냉기정체 회피	1.
2. 관수(열전도율 향상)	1.
3. 피복작물 제거	3.
<개화기 늦서리 피해 과수원 초생재배 방법 개선>	3.
4. 방상팬 활용	4.
<서리방지 방상팬>	6.
5. 난방기(히터) 활용	7.
<과원 서리피해 방지를 위한 방상팬 가동시 열풍기 추가 효과>	9.
<과수 저온피해 방지를 위한 연소하우징 기술>	10.
6. 연막 활용	11.
7. 미세살수(스프링클러) 활용	11.
<늦서리 피해 상습지 사과원에 대한 미세살수 효과>	16.
<배 개화기 저온 내습시 살수법과 인공수분 활용>	17.
* 참고 : 과종별 꽃눈피해 한계온도	18.

1. 냉기정체 회피

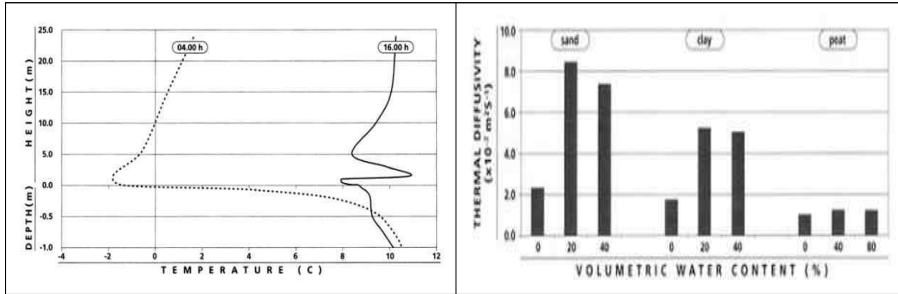
건물, 도로 등에 의해 차가운 공기의 배출이 막히면, 차가운 공기가 모여 서리 피해를 입을 가능성이 있다. 이러한 현상은 도로나 건축 공사로 인해 국부 지형이 바뀔 때 자주 발생한다. 지형도를 주의 깊게 연구하면 종종 큰 서리피해를 예방할 수 있다. 냉기의 배출 흐름 패턴을 사전에 조사하고 장애물(방풍망, 울타리, 흙벽 등)을 적절히 배치하면 냉기로부터 저온피해를 낮출 수 있다.



서리가 내리는 밤 동안, 계곡의 좁은 경사면 위로 밀도가 높은 찬 공기가 축적되면, 차가운 공기가 좁은 곳을 통해 밭으로 빠져나가게 된다(그림). 이러한 냉기 흐름 특성을 고려하여 흐르는 방향에 울타리를 설치하면 작물에 직접적인 냉기 흐름을 상당 부분 막을 수 있다.

2. 관수(열전도율 향상)

사과 과수원에서 봄철 해질 무렵인 오후 4시와 새벽 4시 기준 지상과 지하 위치별 온도 변화는 다음 그림과 같다. 대부분의 온도 변화는 표면 근처에서 일어나는 특성을 보이며, 새벽 4시를 기준으로 지중 0.3m 이하의 토양 온도 변화는 거의 없는 반면, 1.5m 높이까지는 0~-2℃로 낮게 형성, 5~10m 높이에서는 약 1~2℃까지 높게 형성된다.



토양구성 성분인 모래, 점토 및 유기질(피트) 토양의 열적 특성(Monteith 및 Unsworth, 1990)을 보면, 짙은 색의 유기물 토양은 햇빛을 더 많이 흡수하는 경향이 있지만 모래 토양보다 열전도율이 낮다.

결과적으로, 짙은 색의 유기물 토양은 확산성(토양온도의 지상이동)이 적기 때문에 상대적으로 서리 피해를 받기 쉽다. 유기질(피트) 토양의 열용량은 건조할 때와 습기가 있을 때 모두 모래와 점토 토양보다 더 많지만 토양수분 함량에 관계 없이 열전도율은 상당히 낮아 유기질 토양의 농작물은 서리·저온 피해를 훨씬 더 입기 쉽다.

모래와 진흙 토양의 경우 20~40%(40~60kPa)의 용적 수분 함량에서 **확산율이 가장 높다**. 이는 토양이 축축하지만 포화상태가 아닐 때 열이 보다 효율적으로 전달되고 저장된다는 것을 의미한다. 따라서 서리 발생 1~2일 전에 열 저장을 개선하기 위해 관수로 흙을 적셔주는 것이 좋다. 0.3m 이하에서 토양의 온도변화는 거의 없기 때문에 **지중 0.3m 부근까지 침습이 가능한 관수가 필요**하며 가능한 한 토양 표면의 온도를 높게 유지할 수 있도록 토양의 열전도율을 최대한 유지시키는 것이 좋다.

서리 방지에 가장 적합한 토양수분 관리를 결정하는 간단한 방법은 1.0㎡ 이상의 면적에서 수분이 약 30cm 깊이까지 도달할 수 있도록 관수량별로 처리하고 토양 표면에 온도계 설치 후 비교적 맑은 하늘이 지속되는 동안 최저 온도를 모니터링 한다. 그 중 **관측된 온도가 가장 높은 것을 선택**하여 토양에 맞는 관수량(최적 토양수분함량)을 설정하도록 한다.

3. 피복작물 제거

과수원에 풀이나 잡초가 있을 때 표면으로부터 더 많은 햇빛이 반사되고 낮 시간에는 더 많은 증발이 일어난다. 그 결과, 낮 동안 토양에 저장된 에너지의 양이 피복 작물에 의해 감소 된다. 따라서 밤 동안 열전달에 사용할 수 있는 에너지가 줄어들어 서리피해를 받기 쉽다(Thompson, 1987).

스나이더와 코벨(1993)은 적외선 온도계를 사용하여 2~3월 동안 청경된 토양의 표면 온도가 5cm 이상의 풀과 잡초를 가진 토양보다 **일반적으로 1~3°C 더 따뜻하다는 것을** 발견했다. 동일 작형에서 피복 작물이 없는 경우 서리·저온 피해가 적은 반면, 피복 작물을 보유한 작형에서는 심각한 손실을 경험하는 많은 사례들이 있다는 점을 유의하여야 한다.

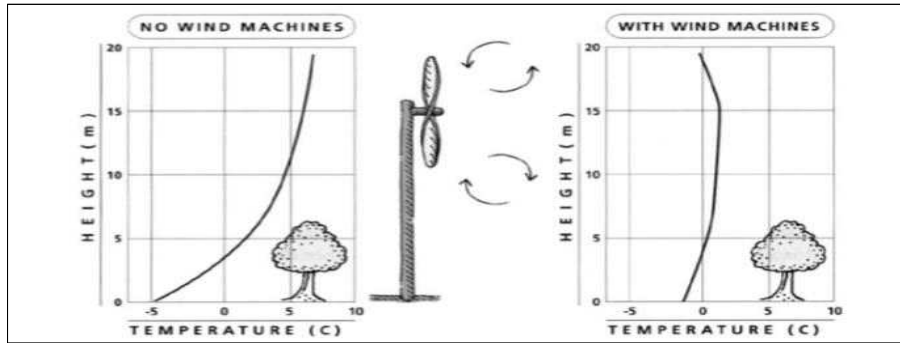
그러나 겨울동안 건조한 기상이 지속될 경우 풀로 덮인 흙보다 청경된 토양이 더 마르기 쉬워 토양의 열전도율을 낮추고 열 저장을 억제하게 되므로, **건조조건이 지속될 때는 토양의 열 전달과 저장을 개선하기 위해 표면을 적시는 관수관리가 필요하다.**(2번 참조)

<국내 연구사례>

제 목	개화기 늦서리 피해 과수원 초생재배 방법 개선(경기도원)															
활용내용	<div>○ 호맥을 봄(4월 1일)에 과수원 면적의 50%만 파종하면 가을(10월1일)에 과수원전면(100%)에 파종한 처리보다 개화기에 지상 100cm 부위의 최저온도를 0.5℃ 상승시킬 수 있음</div> <div>- 최저온도 : 0.3(가을전면)→0.8(봄 부분)℃</div> <div>- 호맥건물수량(kg/10a) : 790(가을전면)→335(봄 부분)</div>															
주요결과	개화기 최저 온도(℃)	<div><div>■ 07년도</div><div>■ 06년도</div><table><thead><tr><th>처리</th><th>가을 100% 파종</th><th>봄 50% 파종</th><th>청경재배</th></tr></thead><tbody><tr><td>07년도</td><td>0.3</td><td>0.8</td><td>1.1</td></tr><tr><td>06년도</td><td>0.8</td><td>1.5</td><td>1.7</td></tr></tbody></table></div>			처리	가을 100% 파종	봄 50% 파종	청경재배	07년도	0.3	0.8	1.1	06년도	0.8	1.5	1.7
		처리	가을 100% 파종	봄 50% 파종	청경재배											
07년도	0.3	0.8	1.1													
06년도	0.8	1.5	1.7													
	처리	가을 100% 파종	봄 50% 파종	청경재배												

4. 방상팬 활용

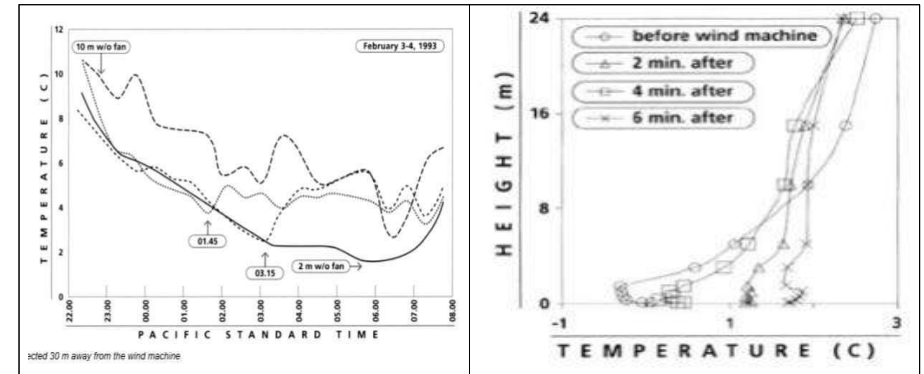
1920년대 미국 캘리포니아에서는 거의 수평으로 공기를 불어 넣는 풍력발전기(또는 선풍기)가 서리 보호 수단으로 도입되었다. 이러한 장치는 현재 세계의 많은 지역에서 일반적으로 사용되고 있다.



방상팬은 일반적으로 상부에 큰 회전팬이 있는 강철탑으로 구성되며 직경이 약 3~6m인 2개 또는 4개의 블레이드 팬이 있다. **팬의 일반적인 높이는 지상 10~11m이며**, 그림에서와 같이 기온 변화가 존재하는 높이로 나무에 부딪히지 않도록 설정되어야 한다. 가장 효과적인 풍력 기계는 약 590~600rpm 프로펠러 속도를 가지고 있다. 대부분의 방상팬은 주탑 방향에서 약간 하향각(약 7°)으로 하여 그 효과를 향상시킨다. 팬이 작동하면 높은 곳에서 공기를 빨아들여 탑과 지면을 향해 약간 아래쪽으로 불어준다. 방상팬은 일반적으로 다른 방법보다 노동요건과 운영비용이 낮다.

가. 작동 이론

방상팬은 열을 발생시키지 않지만, 공기 중에 존재하는 열을 재분배한다. 팬은 표면 가까이에서 따뜻한 공기와 차가운 공기를 혼합하며(그림), 수체 부위의 가장 차가운 공기를 제거하고 약간 따뜻한 주변 공기로 대체한다. 방상팬의 작동 효율은 **과원에서 10m와 1.5m 부근의 온도 차이로 결정**되는데, 팬의 영향을 받는 지역 내에서 1.5m에서 측정한 평균 공기 온도는 10m 부위의 평균 온도 대비 약 1/3 내외로 상승되며, 상승된 온도 정도가 클수록 보다 나은 피해방지 효과를 거양할 수 있다.

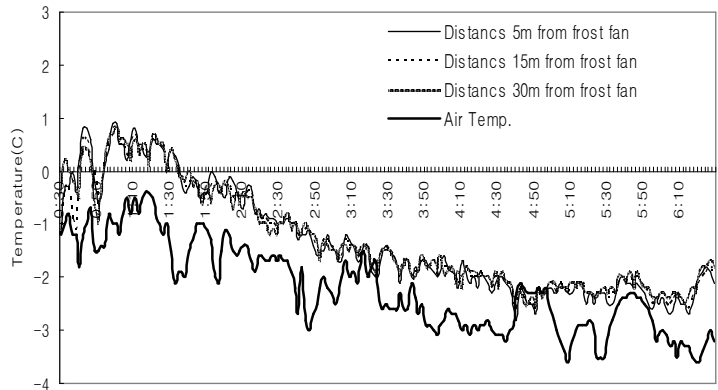


일반적으로, 75kW(100마력, 1마력은 약 0.75kW)의 방상팬은 4~5 ha (즉, 반경 약 120m~125 m)마다 필요하다. 방상팬 1대를 사용할 경우, ha 당 엔진 출력은 약 18.8kW(25마력)가 필요하다. 여러 대의 기계를 사용할 경우 ha당 약 15kW(20마력)의 엔진 동력이 권장된다. 주탑과의 거리에 따라 보호효과는 감소하므로, 구역에서의 일부 중첩은 효과를 증대시킨다.

방상팬 작동 전후의 온도 프로파일(기계로부터 30m)을 살펴보면 작동 후 6분이 되면 지상 1.5m 부위의 온도가 약 1.5°C 상승되고 지상 10m 부근에서는 온도가 약 0.7°C 하강하는 역전현상을 일으킨다(리베이루 외, 2002).

나. 작동 및 중지

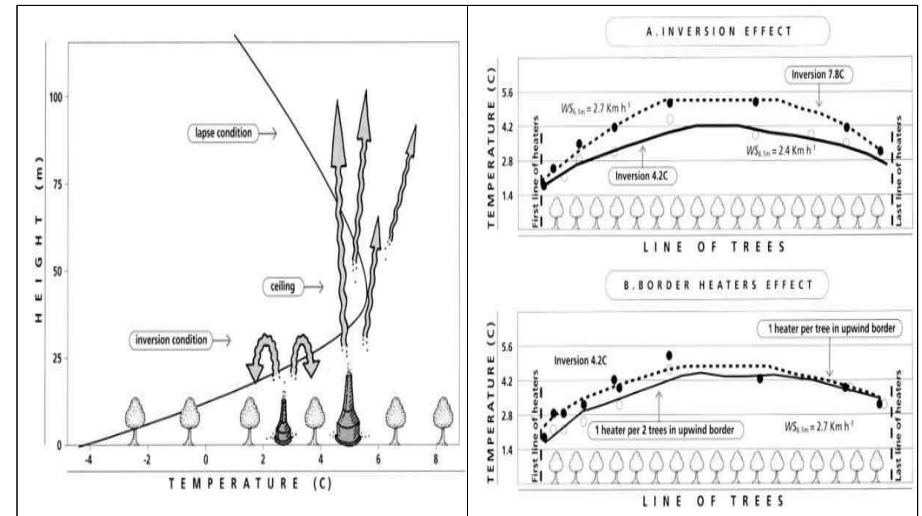
안정적인 반전이 일어나는 조건에서 공기는 지반 근처에서 정체되기 쉽다. **방상팬은 일반적으로 공기 온도가 약 0°C에 도달했을 때 시작되며**, 야간에 복사면의 온도는 보통의 공기 온도보다 낮기 때문에 공기 온도가 작물피해 온도에 이르면 작동시키는 것이 좋다. 작동 후 약 30분 내외로 과원 10m 부근의 온도에 근접하기도 한다(그림). 단, 만약 수체 부위가 낮이나 저녁에 젖었을 경우, 얼음이 형성되기 전에 미리 풍력발전기(또는 난방기)를 가동시켜 말리도록 한다. **바람이 약 2.5ms⁻¹(8km h⁻¹) 이상 불면 방상팬을 사용하지 않는 것이 좋다.** 바람이 2.5m s⁻¹ 이상일 경우, 역전이 발생할 가능성이 없고 팬 블레이드가 피해를 입을 가능성이 있다. 바람이 2.5ms⁻¹ 이상일 경우의 조건은 나뭇가지가 약간 흔들리거나 리본 등이 좌우로 30cm 정도 흔들리는(바람개비가 돌아가는 수준) 상태로 판단한다.

제 목	서리방지 방상팬(사과연)
활용내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지주 : 태풍, 호우에 견딜 수 있는 8m 전주(지면하 1.5m 매설) ○ 전원 : 3상 220V 또는 380V ○ 설치대수 : 1마력 2.5~3대/10a, 3마력 1대/10a를 기준으로 서리방지 유효면적을 고려하여 5~10%를 가감하여 설치 ○ 설치방법 : 1마력 20m×20m, 3마력 45m×34.2m ○ 펜 설치높이 : 지상 7m 부근(지형에 따라 가감) ○ 펜부착 각도 : 과수원 전면에 45°, 회전각도 60~90° ○ 온도계 설치 : 과수 온도가 최저로 내려가기 쉬운 장소(1.5m) <ul style="list-style-type: none"> * 작동 온도 : 발아기 2℃, 개화기 이후 3℃로 설정 * 정지 온도 : 설정 온도보다 1~2℃ 높게 조절 ○ 송풍방향 : 과원특성에 따라 자연기류 방향을 설정
주요결과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기온 상승 효과 : 1,000㎡ 범위내에서 0.9~2.5℃(평균 1.6℃) ○ 수피내의 온도를 기온보다 2.5℃ 더 높게 유지  <p> — Distances 5m from frost fan Distances 15m from frost fan - - - Distances 30m from frost fan — Air Temp. </p> <p>* 단점 : 기온이 방상팬의 효과 온도범위 이하로 발육단계별 꽃눈피해 한계온도보다 낮아질 경우 피해 발생</p>

5. 난방기(히터) 활용

히터에서 불어내는 바람의 공기 온도는 약 635℃~1,000℃ 로, 히터에서 가열·방출된 공기는 상승하여 다른 공기와 함께 혼합, 높은 곳으로 퍼진다. 이후 혼합된 공기는 식어진 후 밀도가 높아져 하강하게 되는데, 이는 역전층 내에 순환패턴을 생성하게 된다(그림). 역전이 약하거나 히터 공기가 너무 뜨거우면 가열된 공기가 높게 상승하여 역류 내 순환패턴이 생성되지 않는다.

공기의 역전이 강할 때(일정 높이까지 온도 변화가 큰 경우), 가열된 공기는 낮은 높이까지 상승하고 난방기의 영향을 받는 부피는 작아진다. 가열된 부피가 작기 때문에 **강한 역전 하에서 난방기는 공기 온도를 올리는 데 더 효과적이다**. 반대로 공기의 역전이 약할 때(일정 높이까지 온도변화가 크지 않은 경우), 공기 온도를 증가시키는 효율성은 떨어진다.



난방기가 공기를 따뜻하게 하기 때문에 군락 내부의 공기는 일반적으로 상승하고 바깥의 찬 공기는 외부로부터 유입되어 상승된 공기를 대체한다. 따라서 이러한 경계 부위에서 서리피해 발생이 예상되기 때문에, **가장자리 경계면에서는 더 많은 난방기가 필요하다**는 점을 인식해야 한다.

케프너(1951)는 동풍(그래프의 왼쪽에서 오른쪽)으로 부는 $0.7\text{ms}^{-1} \sim 0.9\text{ms}^{-1}$ 바람 조건에서 공기의 역전층 강도(4.2°C , 7.8°C)에 따른 감귤원의 난방기 설치 효과를 분석하였다.

<감귤원 시험조건>

면적(ha)	재식거리(m)	수고(m)	수폭(m)	난방기수(개)	연료사용량
6 (600×600m)	6.7×6.7	4.6	4.6	112 * 열 중앙 설치	개당 2.8ℓ 전체 315ℓ

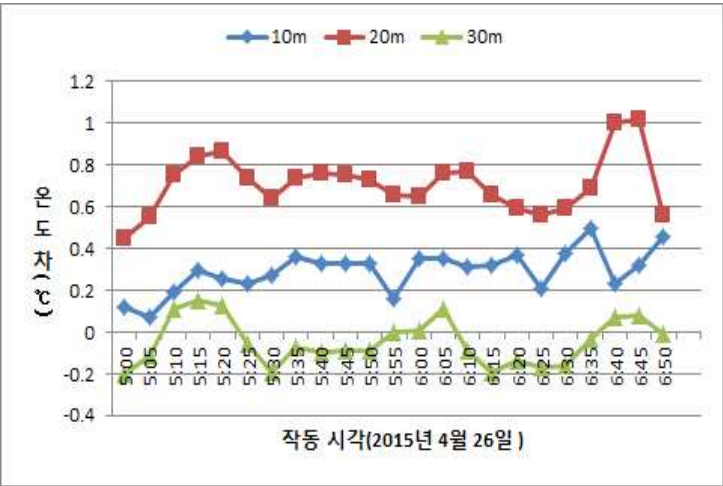
※ 우리나라 기상청 바람세기 기준




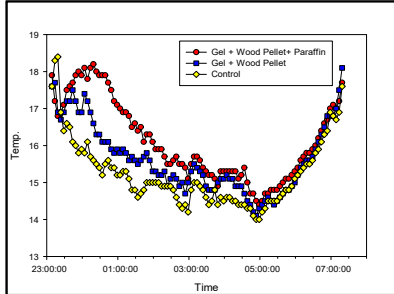
구분	0~0.2m/s	0.3~1.5	1.6~3.3	3.4~5.4	5.5~7.9
명칭	고요	실바람	남실바람	산들바람	건들바람
상태	연기가 똑바로 올라감	연기가 날리는 모양	나뭇잎 살랑	가느다란 가지 흔들림	먼지가 일고 작은가지 흔들림

감귤원의 중앙을 가로지르는 횡단면에서 기온의 증가는 과원의 중앙부위에서 가장 높았다. 0.7ms^{-1} (약 2.4kmh^{-1})의 바람에서 4.2°C 의 공기 역전 강도를 가진 밤의 경우, 과원 가장자리의 온도는 한 가운데의 약 40% 정도(2.6°C)를 보였다. 0.8ms^{-1} (약 2.7kmh^{-1})의 바람에서 7.8°C 의 공기 역전 강도를 가진 경우는 과원 한가운데와 비교하여 약 60%(3.6°C)였다. 따라서 공기 역전 강도가 크고 실바람 수준의 바람세가 지속될 경우, 저온·서리 피해방지 효과가 크다고 할 수 있다.

난방기 설치 수에 있어서는 나무 두 그루당 하나의 히터가 아닌, 나무 한 그루당 하나의 히터가 있을 때, 거의 1°C 만큼 온도가 상승 되었다. 따라서 난방기(히터) 설치에 의한 저온피해 경감을 위해서는 바람이 불어 오는 시작지점과 끝지점에 추가 난방기를 설치하는 것이 보다 안정적인 피해 방지에 도움이 될 것이다. 다시 설명하면 시작지점과 끝지점은 나무 한 그루당 1개, 중간지점은 두 그루당 1개를 설치하는 방식이 권장된다.

<국내 연구사례>

제 목	과원 서리피해 방지를 위한 방상팬 가동시 열풍기 추가 효과(사과연)
활용내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 방상팬의 효과 범위를 넘어서 기온이 발육단계별 꽃눈피해 한계온도보다 낮아질 경우 저온 피해가 발생 <ul style="list-style-type: none"> - 이 때 방상선 가동과 함께 풍기로 더운 공기를 공급함으로써 온도상승 효과를 도모 ○ 방상팬이 설치되어 있는 기동마다 열풍기 닥터를 설치 <ul style="list-style-type: none"> - 열풍기 사양 : 최대배출 공기온도 : 600°C 연료소비량(경유) : 5.1 L/hr, 발열량 41,350kcal/hr - 봄 서리 피해가 예상되면 방상팬 온도 설정과 열풍기(히터)를 설치 <ul style="list-style-type: none"> * 방상팬의 작동온도는 발아기 2°C, 개화기 이후 3°C에 작동 설정 * 열풍기(히터) 작동은 0°C에서 작동 설정
주요결과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 방상팬에서 20m 거리까지 평균 $0.3 \sim 0.7^{\circ}\text{C}$ 기온 상승 <ul style="list-style-type: none"> - 기온이 발육단계별 꽃눈피해 한계온도보다 낮아질 경우 초봄 서리피해 경감 

제 목	과수 저온피해방지를 위한 연소하우징 기술(배연)
활용내용	<p>○ 연소자재 조성: 인화물을 담은 금속용기와 인화물 3종이 분리되어 배치</p> <p>① 금속용기: 철 등 금속물로 뚜껑부위를 당겨 분리가 되도록 구성</p> <p>② 인화물(v/w): 파라핀액 40~60%, 목재 20~30, 메탄올 젤 20~30</p> <p>③ 인화물용기: PE 또는 종이 재질</p> <p>- 이용기술: 6×6㎡로 배치</p> <p>- 주의사항: 배치장소 및 주변 정리 필수(화재 예방)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: center;">연소자재 옆면 연소자재 윗면</p>
주요결과	<p>○ 연소시 3시간 동안 2℃ 상승</p> <p>(1) 초기비용이 10a당 20~30만원 수준으로 경제적</p> <p>(2) 화재위험을 최소화하도록 철제 금속용기를 도입</p> <p>(3) 기존 연소자재(등유, 왕겨, 톱밥 등)에 비해 불완전연소시 발생하는 가스유출량을 약 30%수준으로 크게 낮음</p> <p>(4) 초기 발화시 생기는 화염수준이 마지막 연소시점에 이르기까지 고르게 유지</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: center;">처리상황(연소 도중, 연소 후) 온도상승효과</p>

6. 연막 활용

난방기(히터) 활용방법은 방출되는 열에서 오는 것이지 연기로 인한 것이 아니라는 점은 잘 알려져 있다(Collomb, 1966). 연기는 하늘로 날아올라 가시성을 감소시키지만, 결빙기에는 무시해도 될 정도의 영향을 미친다. 평균 연기 입자크기는 1.0mm 직경(Mee와 Bartholic, 1979년) 미만으로서 가시 범위(0.4~0.7mm)에서 적외선의 전송에 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서 지표면에서 위로 올라오는 적외선은 주로 흡수되지 않고 연기를 통과하게 되므로, 결과적으로 연기는 밤에 **적외선 등의 장파 복사에 거의 영향을 미치지 않으며 서리 방지에 거의 도움이 되지 않는다.**

연기는 거의 또는 전혀 이롭지 않고 공기를 오염시키기 때문에 연기의 발생을 최소화하고 연소의 열효율을 극대화하는 것이 좋다. 해돋이 때 연기가 태양 복사를 막고 농작물의 발열을 지연시켜 연료 소비량이 증가하고 손상이 커질 수 있다. **따라서 서리 방지에 연막 활용은 권장하지 않는다.**

7. 미세살수(스프링클러) 활용

가. 기본 개념

물은 우리가 온도계로 측정하는 현열(顯熱, sensible heat)과 잠열(潛熱, latent heat)로 위상 변화(고체↔액체↔기체)를 가진다.

* 현열 : 상태변화 없이 온도변화에만 사용하는 열

* 잠열 : 온도변화 없이 상태변화를 위해 사용되는 열량(기체↔액체↔기체)



물의 냉각과 결빙을 통해 서리 피해를 방지할 수 있다. 미세살수(스프링클러)를 이용한 서리·저온피해 방지를 이해하려면 물의 열 함량 변화 및 현열과 잠열 사이의 에너지 변동을 알아야한다.

- ◇ 1L의 물이 0°C에서 얼 때,
 - 위상 변화는 80kcal(335kJ)의 잠열을 방출시킨다.
 - 물이 20°C일 경우, 방출되는 에너지 총량은 100kcal(418kJ)가 된다.
 - * 즉, 20°C에서 0°C로 전환되는 과정에서 발생하는 현열 20kcal와 0°C 물이 얼면서 발생하는 잠열 80kcal가 더해진 것이다.
 - 물이 30°C일 경우, 0°C로 냉각될 때 총 110kcal(460kJ)를 제공한다.
 - * 즉, 30°C에서 0°C로 전환되는 과정에서 발생하는 현열 30kcal와 0°C 물이 얼면서 발생하는 잠열 80kcal가 더해진 것이다.

20°C의 물 1L를 사용하여 100kcal(418kJ)의 열을 얻을 수 있다면 1.1L의 물로는 110kcal(460kJ)을 얻을 수 있어 10%의 물만 더 가하면 10°C 만큼 물을 가열하는 것과 같은 에너지를 제공하게 된다. 따라서 서리피해 방지를 위한 열원의 공급을 증가시키기 위해서는 물 온도를 높이는 것도 중요하지만 경제적으로는 살수량을 증진시켜 활용하는 것도 좋은 선택이 된다.

그러나 살수에 의한 물은 공기 중 또는 수체에 있는 상태에서 증발(액체→기체)과 승화(고체↔기체) 과정을 거치기 때문에 주변 기온을 빼앗아 공기 온도를 떨어뜨린다. 살수 상태에서 증발율은 비교적 낮지만 에너지 손실이 발생하게 되는데, 액체에서 수증기로 상변화(증발) 시 0°C 온도에서 손실량은 597kcal(2,501kJ) 정도이고 얼음에서 수증기로 상변화(승화) 시 0°C 온도에서의 손실량은 677kcal(2,836kJ)이 된다.

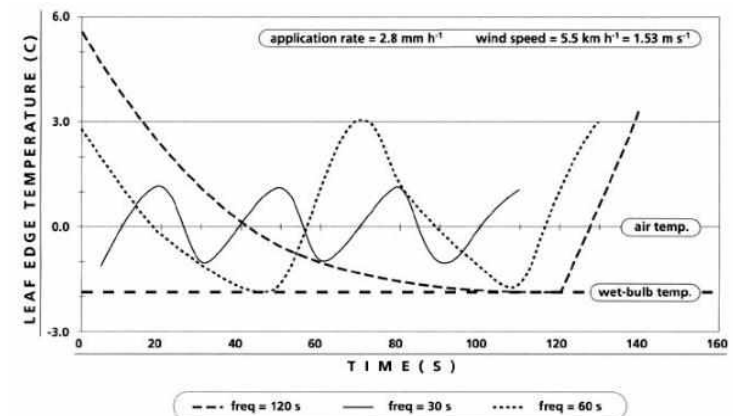
다시 말하면 20°C의 물 1L를 0°C로 냉각시키면서 방출되는 에너지는 100kcal(418kJ) 인데, 물이 어는 과정에서 증발과 승화 과정이 일어나게 되면 오히려 흡수되는 열량(공기 온도를 빼앗는 상황)이 6배 이상 되게 된다. 따라서 살수가 진행되는 과정에서 미세살수(스프링클러) 장치의 고장 및 물량 부족, 물 분사 장치의 결빙 등으로 물 공급이 원활하지 않을 경우는 오히려 공기 온도를 하강시켜 서리피해가 조장되는 역효과가 발생하게 된다. 이러한 점을 이해하고 문제점이 발생 되지 않도록 하는 것이 매우 중요하다.

나. 시작 및 중지

서리피해 방지를 위해 미세살수(스프링클러)를 가동하고 멈추는 것은 과원의 온도와 습도에 달려 있다. 스프링클러 시스템이 처음 가동되면 공기 온도는 떨어지지만, 공기 온도는 물방울의 온도 아래로 떨어지지 않고 물이 얼어서 잠열을 방출하기 시작하면 보통 다시 상승한다.

회전 스프링클러를 이용하여 시간 당 2.8mm의 물량으로 30, 60, 120초마다 스프링클러를 작동시켰을때 잎 가장자리의 온도 변화를 조사하였는데 (Wheaton and Kidder, 1964), 살포 초기에는 증발(또는 승화)이 일어나 외기온도를 떨어트리게 된다. 60초와 120초마다 작동되는 조건에서는 표면 온도가 습구온도만큼 낮아져 공기 온도보다 상당히 낮게 됨으로써 물이 부족하면 손상을 입힐 수 있다. 또한 회전속도가 너무 느리거나 스프링클러를 너무 일찍 멈추면 피해 온도 이하로 기온이 떨어져 손상을 야기할 수 있다.

따라서 30초 간격으로 스프링클러를 작동하여 표면온도를 습구온도보다 항상 높게 유지하고 최소한 외기온도와 같거나 높게 유지되도록 살포간격(시간)을 줄이는 살포방법을 선택하는 것이 좋다.



서리피해 방지를 위해 스프링클러를 사용하는 것에 관한 대부분의 문헌에서 출발 및 정지 공기 온도는 이슬점 및 습구 온도에 비례하여 결정된다.

그러나 대부분 농가에서는 이슬점 온도센서와 습구 온도계가 없는 경우가 많으므로 습구 온도계는 가급적 구비하도록 지도하며, 공기 온도와 상대 습도를 가지고 이슬점 온도를 파악한 후 미세살수(스프링클러) 작동 여부를 의사결정 할 수 있도록 한다.

- 국내에서의 미세살수는 밤사이 온도가 1~2℃ 도달되었을 때(피해 예상온도보다 높게 설정) 살포를 시작하고 일출 후에 중단한다.
- 노즐이 어는 조건은 이슬점 온도와 관련성이 있는데, 우리나라에서의 3월과 4월의 상대습도가 50~70% 수준인 점을 감안할 때 이슬점 온도는 -2.9~-9.2℃로 노즐의 결빙은 크게 문제가 되지 않는다고 볼 수 있다.

상대습도(%)	공기 온도(℃)			
	-2.0	0.0	2.0	4.0
100	-2.0	0.0	2.0	4.0
90	-3.4	-1.4	0.5	2.5
80	-5.0	-3.0	-1.1	0.9
70	-6.7	-4.8	-2.9	-1.0
60	-8.7	-6.8	-4.9	-3.0
50	-11.0	-9.2	-7.3	-5.5
40	-13.8	-12.0	-10.2	-8.4
30	-17.2	-15.5	-13.7	-12.0
20	-21.9	-20.2	-18.6	-16.9
10	-29.5	-27.9	-26.4	-24.8

* 평균 해수면에서의 공기온도 및 상대습도에 따른 이슬점온도(표 내부)의 함수로서 미세살수(스프링클러)를 이용한 결빙 방지 최소 시동·정지 공기 온도

또 한가지 중요한 것은 눈(芽), 꽃 등의 발육단계에 따라 서리·저온피해 발생이 예상되는 온도에 있어 공기온도보다 습구온도가 중요하게 작용된다는 점을 알아야 한다.

다음 표와 같이 태양이 식물을 비추고 공기 온도가 0℃ 이상일 경우에도 습구 온도는 -0.5℃~-3.0℃에 이를 수 있어 서리·저온피해 발생이 예상되는 온도에 노출될 수 있기 때문에 피해온도 이상 온도에 도달할 때까지 스프링클러를 끄지 말아야 한다. 즉, 물부족이 문제가 아닌 경우라면 스프링클러를 끄기 전에 습구 온도가 0℃를 초과하도록 하는 것이 중요하다.

이슬점온도(℃)	습구온도(℃)						
	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0
0							0
-0.5						-0.5	0.3
-1.0					-1.0	-0.2	0.6
-1.5				-1.5	-0.7	0.1	1.0
-2.0			-2.0	-1.2	-0.4	0.4	1.2
-2.5		-2.5	-1.7	-0.9	-1.1	0.7	1.5
-3.0	-3.0	-2.2	-1.4	-0.6	0.2	1.0	1.8
-3.5	-2.7	-2.0	-1.2	-0.4	0.4	1.3	2.1
-4.0	-2.5	-1.7	-0.9	-0.1	0.7	1.5	2.3
-4.5	-2.2	-1.4	-0.7	0.1	1.0	1.8	2.6
-5.0	-2.0	-1.2	-0.4	0.4	1.2	2.0	2.8
-5.5	-1.7	-1.0	-0.2	0.6	1.4	2.2	3.1
-6.0	-1.5	-0.7	0.1	0.9	1.7	2.5	3.3
-6.5	-1.3	-0.5	0.3	1.1	1.9	2.7	3.5
-7.0	-1.1	-0.3	0.5	1.3	2.1	2.9	3.7
-7.5	-0.9	-0.1	0.7	1.5	2.3	3.1	3.9
-8.0	-0.7	0.1	0.9	1.7	2.5	3.3	4.1
-8.5	-0.5	0.3	1.1	1.9	2.7	3.5	4.3
-9.0	-0.3	0.5	1.3	2.1	2.9	3.7	4.5
-9.5	-0.1	0.7	1.5	2.2	3.1	3.9	4.7
-10.0	0.1	0.8	1.6	2.4	3.2	4.0	4.9

* 평균 해수면에서의 습구 및 이슬점 온도(℃)에서 공기온도(표 내부)의 변화

다. 시스템 설치

수원(水源) 확보가 가능한 상태에서 서리방지를 위해 특별히 설계된 시스템이 가장 좋다(Rogers and Modlibowska, 1961; Raposo, 1979). 일반적으로 분포 균일성은 직사각형 형태보다 정삼각형의 설치 간격을 두는 것이 좋으며 수채 상단 30cm 이상에 설치해야 한다. 특히, 살포 균일성이 정절하고 결빙 등이 예방되는 장치를 사용하여야 한다. 하천이나 지하수를 사용할 경우 시스템이 막히지 않고 작동되도록 필터 설치를 고려한다.

< 참 고 >

과종별 꽃눈피해 한계온도

○ (사과) 꽃눈발육 단계별 한계온도 및 피해양상

구 분	꽃눈 발육 단계								
	은 색 선단기	녹 색 선단기	녹색기	단단한 화총기	분홍 초기	완 전 분홍기	개 화 초기	만개기	만개 후기
과 거 표준온도	-8.9	-8.9	-5.6	-2.8	-2.8	-2.2	-2.2	-1.7	-1.7
10% 동사 평균온도	-9.4	-7.8	-5.0	-2.8	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2
90% 동사 평균온도	-12.0	-9.4	-9.4	-6.1	-4.4	-3.9	-3.9	-3.9	-3.9

○ (배) 생육단계별 서리피해 한계온도

구분	꽃봉오리가 화총안에 있을 때	꽃봉오리가 끝이 엷은 분홍색일 때	꽃봉오리가 백색일 때	개 화 직 전	만개기 이 후
한계온도 (℃)	-3.5	-2.8	-2.2	-1.9	-1.7


○ (포도) 생육단계별 서리피해 한계온도

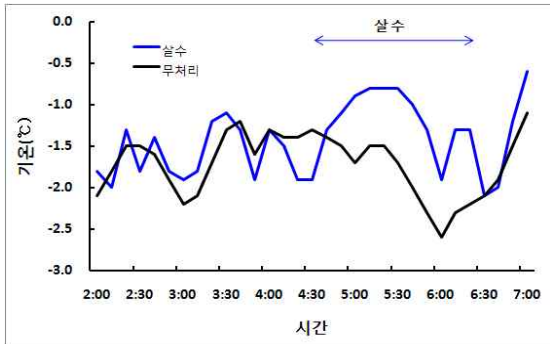
구 분	12~1월	2월	3월	4월	5월
생육단계	휴면기			싹 트 고 꽃 필 때	열 매 맺 힐 때
동해온도	-20 ~ -25	-20 ~ -25	-15 ~ -20	-0.6	-1.1

○ (복숭아) 생육단계별 서리피해 한계온도

생육단계	휴면기	꽃봉우리시기	개 화기	결실기
동해온도(℃)	-15 ~ -20	-1.7	-1.1	-1.1

<국내 연구사례>

제 목	늦서리 피해 상습지 사과원에 대한 미세살수 효과(사과연)																																			
활용내용	<div>○ 노즐간격 : 1.5m</div> <div>○ 분무량 및 압력 : 7.0 ℓ /hr, 3kg/cm²</div> <div> * 기존 스프링클러 4~5mm/hr → 미세살수 1~1.5mm/hr</div> <div>○ 작동 및 중지 : 외기 온도 1~2℃ 시작, 일출 후 중지</div>																																			
주요결과	<div>○ 늦서리 피해가 예상될 때 사과원에 미세살수 처리에 의해 화기가 0℃ 가까운 온도로 유지되며 1℃ 전후의 기온 상승효과가 있어 늦서리 피해 방지</div> <div>- 사과원의 미세살수 처리에 의한 늦서리 피해 방지효과</div>																																			
	<table><tr><th colspan="2" rowspan="2">처 리</th><th rowspan="2">조사 화총수 (개)</th><th colspan="3">화기 피해율 (%)</th></tr><tr><th>중심화</th><th>중심화+측화</th><th>계 (화총피해율)</th></tr><tr><td rowspan="2">후지</td><td>살 수</td><td>612</td><td>0.8±0.4</td><td>0.0</td><td>0.8±0.4</td></tr><tr><td>대 조</td><td>300</td><td>7.3±0.6</td><td>0.0</td><td>7.3±0.6</td></tr><tr><td rowspan="2">추광</td><td>살 수</td><td>300</td><td>6.0±1.0</td><td>2.3±1.5</td><td>8.3±1.4</td></tr><tr><td>대 조</td><td>309</td><td>9.3±0.6</td><td>20.6±1.5</td><td>29.8±2.0</td></tr></table>					처 리		조사 화총수 (개)	화기 피해율 (%)			중심화	중심화+측화	계 (화총피해율)	후지	살 수	612	0.8±0.4	0.0	0.8±0.4	대 조	300	7.3±0.6	0.0	7.3±0.6	추광	살 수	300	6.0±1.0	2.3±1.5	8.3±1.4	대 조	309	9.3±0.6	20.6±1.5	29.8±2.0
	처 리		조사 화총수 (개)	화기 피해율 (%)																																
				중심화	중심화+측화	계 (화총피해율)																														
	후지	살 수	612	0.8±0.4	0.0	0.8±0.4																														
대 조		300	7.3±0.6	0.0	7.3±0.6																															
추광	살 수	300	6.0±1.0	2.3±1.5	8.3±1.4																															
	대 조	309	9.3±0.6	20.6±1.5	29.8±2.0																															
※ 기상조건 : 최저기온 -3.4℃, 풍속 : 0.45㎧ (2002. 4. 4)																																				
																																				

제 목	배 개화기 저온 내습시 살수법과 인공수분 활용(원예원)																
활용내용	<ul style="list-style-type: none">○ 배 개화기 저온피해가 예상될 경우 살수처리<ul style="list-style-type: none">- 1℃에 도달되면 수관상부 살수처리를 시작하고, 해가 뜬 이후 살수 중단.- 중간에 살수를 중단하면 더 큰 피해를 입을 수 있음○ 개화기 저온피해 발생시 정상화에 인공수분 실시<ul style="list-style-type: none">- 일반적으로 인공수분은 오전 10~3시에 실시하나 다음날 강우, 강풍 등 악조건이 예상되면 오후 늦게까지도 인공수분 실시																
주요결과	<ul style="list-style-type: none">○ 물이 충분할 때는 1℃에서 살수를 시작하고, 물이 충분하지 못하면 0℃에서 살수를 시작함. 살수를 시작하면 해가 뜬 이후 살수를 중단하고, 중간에 물이 부족하여 중단되지 않도록 주의<ul style="list-style-type: none">- 사과원의 미세살수 처리에 의한 늦서리 피해 방지효과																
	<table><tr><th>구 분</th><th>꽃눈피해율 (%)</th><th>착과수 (과/10a)</th><th>수확량 (kg/10a)</th></tr><tr><td>살수+적기인공수분</td><td>약 15%</td><td>7,200</td><td>2,250 (83.3)</td></tr><tr><td>인공수분(대 조)</td><td>약 75%</td><td>-</td><td>895</td></tr><tr><td>평년</td><td>-</td><td>7,200</td><td>2,700 (100)</td></tr></table>	구 분	꽃눈피해율 (%)	착과수 (과/10a)	수확량 (kg/10a)	살수+적기인공수분	약 15%	7,200	2,250 (83.3)	인공수분(대 조)	약 75%	-	895	평년	-	7,200	2,700 (100)
	구 분	꽃눈피해율 (%)	착과수 (과/10a)	수확량 (kg/10a)													
	살수+적기인공수분	약 15%	7,200	2,250 (83.3)													
	인공수분(대 조)	약 75%	-	895													
평년	-	7,200	2,700 (100)														
※ 평년대비 수확량 감소 원인 : 과실비대 저조																	
																	
살수에 의한 기온 상승효과 (2007.4.5)																	

라. 가열수(뜨거운 물)

마르톨프(1989)는 마이크로 스프링클러 시스템을 통해 70℃로 가열된 물을 플로리다 감귤류 과수원에 살포한 결과, 스프링클러 헤드에서 3m 떨어진 잎의 온도는 거의 영향을 주지 않았지만, 나무 아래의 잎의 온도는 4℃ 이상 상승하는 것을 발견했다.

물이 50℃일 경우 0℃로 냉각되어 배출하는 에너지는 130kcal(544kJ)이다. 만약 20℃의 물로 시간당 2.6mm를 살수할 경우, 동일 열량을 내기 위해서 50℃의 물은 2.0mm면 충분하다(물 23% 절감).

따라서 가열된 물의 사용은 상습적으로 심각한 서리피해가 발생하거나 제한적인 수원을 가진 재배자들에게 유용한 대안이 될 수 있다. 그러나 충분한 수원 확보가 가능하거나 온화한 재배조건인 경우, 물을 데우는 데 필요한 난방 시스템, 연료 및 노동력의 추가 비용을 지불하는 것 보다는 미세살수(스프링클러) 시스템을 설계하는 것이 효율적일 수 있다.

마. 포그 형태의 마이크로 스프레이(미세입자)

바르톨리(1979)는 마이크로 스프레이가 난방기의 1% 미만, 방상팬의 약 10%, 스프링클러의 약 20% 미만의 에너지를 사용한다고 보고했다.

농작물을 완전히 덮는 포그 형태의 분사는 작물을 보호하는데 유용한데, 이를 충족시키기 위해서는 물방울이 땅에 떨어지지 않도록 노즐 직경이 작아야 한다(1~8mm).

비록 살포 효과는 가벼운 바람과 비교적 높은 습도의 유무에 달려 있지만 포그 형태의 마이크로 스프레이 방법의 장점은 운용비용이 낮다는 것이다. 다만 서리 정도가 다소 심한 지역에서는 포그 형태로 완벽한 피해방지는 부족한 점도 고려해야 한다. 포그 형태의 방법은 대체로 약한 서리·저온 현상을 방지하기 위해 사용하는 것이 좋다.