

서리상습지 배 과수원에서의 야간 냉각 특성

황규홍¹ · 이정택¹ · 윤진일² · 허승오¹ · 심교문¹

¹농업과학기술원 · ²경희대학교 생명자원과학연구원/농학과
(2001년 10월 25일 수락)

Characteristics of Nocturnal Cooling at a Pear Orchard in Frost-Prone Area

Kyu-Hong Hwang¹, Jeong-Taek Lee¹, Jin-Il Yun², Seung-Oh Hur¹ and Kyo-Moon Shim¹

¹National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea

²Department of Agronomy/Institute of Life Science and National Resource,

Kyung Hee University, Suwon 449-701, Korea

(Manuscript accepted October 25, 2001)

ABSTRACT

Cooling rate shows the highest as about 0.7°C/hr on spring season and the lowest as about 0.3°C/hr on september at plain place. The correlation coefficient between net radiation and cooling rate from sunrise to sunset was 0.63**, It became higher to 0.90** when the wind speed decreased lower than 0.5 m/sec, and it decreased as the wind speed increased. On a clear and calm day, cooling rates were observed as 1.4°C/hr on the plain (site 1, 2, 3), 1.2°C/hr on the slope (site 4, 5) and 0.6°C/hr on the top of mountain (site 6). In condition of the wind speed is 1.2~2 m/sec on a clear and calm day and the temperature on the top of mountain is lower than that of slope and plain, the temperature on the slope (site 4, 5) was increased unlike our expectation.

Key words : frost day, cooling rate

I. 서 론

과수는 영년생 작물이므로 재배 지역의 환경조건이 매우 중요하다. 서리나 저온은 과수 묘목전체를 죽이거나 조직에 치명적인 영향을 입힌다. 우리나라의 경우 사과, 배 재배는 봄철 밭아, 개화기를 전후하여 내리는 늦서리 피해를 받는다. 이 시기에 서리가 내리면 화기 손상에 의한 수정 장애로 낙과, 또는 기형과 비율이 많아지며, 특히 화충 내에서 생육이 빠른 중심화가 이러한 피해를 입기 때문에 품질저하는 물론 안정 생산을 저해하는 요인이 된다. 단감 재배는 첫서리의 피해가 문제되고 있는데, 당도를 높이기 위해 수확시기를 늦추면서 첫서리의 피해를 받아 과육이 물러지는 등의 문제가 발생하고 있다.

맑고 바람이 없는 저녁, 지표근처에서 냉각은 많아

지고 일출 전후에 최저기온이 나타나는 것이 일반적이다(Nishiyama, 1985). 그리고 기온은 지표근처에서 가장 낮고 고도가 높아질수록 높아진다. 이러한 상태를 지표역전(surface inversion) 또는 지면역전(ground inversion)이라 한다. 지표 역전층은 지표근처에 강한 복사냉각(radiative cooling)이 있거나, 주위의 높은 지대 찬 공기가 낮은 지대로 흘러 들어 형성된다. 이것은 찬 공기의 배출에 따른 이류와 축적 때문에 하향장파복사의 양이 줄어들고 지표면에 복사냉각이 강해지는 것이다(Maki *et al.*, 1985a, 1985b, 1986).

지형적으로 볼 때, 맑고 바람이 잔잔한 밤에는 계곡과 저지대에서 기온이 가장 낮게 나타나고, 풍속의 증가, 안개 또는 구름의 유입이 없다면 일몰 후 짧은 시간 내에 급격한 복사냉각으로 인하여 계곡과 산 정상 온도 차이는 크게 나타난다(Bogren and Gustavsson,

1991; Gustavsson *et al.*, 1998). 또한 지표근처의 온도는 토양 열용량, 열전도, 지표면 복사능, 대기의 깊이, 지형이나 식생에 의한 복사냉각 차단 등의 여러 요인에 의해 영향을 받는다(Lindkvist and Lindqvist, 1997). Thompson(1986)에 의하면 복잡한 지형에서 지형에 의한 공기의 흐름차단의 효과는 온도 변이에 매우 중요한 요소로서 경사가 급하고 좁은 계곡의 차가운 지표면에 상층의 따뜻한 공기의 혼합을 막아 지표면의 냉각을 더욱 가속시킨다고 하였다. Gustavsson(1995)은 숲도 비슷한 효과를 가져, 지표면 근처에 차가운 공기의 차단역할을 한다고 하였다. 방풍림의 효과는 풍속에 의존하고, 맑은 날 저녁에 냉각된 지표면이 안정되고 풍속이 낮을 때 가장 크게 나타났는데, 주변지형에 의한 복사냉각은 노출된 지형과 차단된 지형에서 최대 6°C의 차이를 보였고, 평균 풍속이 1.5 m/sec 정도에서 공기 흐름의 차단 정도에 따라 3~5°C의 온도 차이를 보였다(Lindkvist and Lindqvist, 1997). 낮은 밀도의 방풍림은 밀도가 높은 방풍림보다 50% 이상의 서리를 감소시키고, 키가 큰 방풍림이 작은 방풍림보다 서리 감소 효과가 크다(Blennow, 1998).

본 연구는 상해 위험지역으로 알려진 경상남도 하동군 하동읍 화심리 배 과수원을 중심으로 주위지형에 따른 국지 미세기상 변화와 서리가 발생시의 접지층 온도변화 및 대기의 냉각 양상을 분석하였다.

II. 재료 및 방법

연구 대상지역은 고도에 따른 국지기상 변화를 측정하기 위해 무인기상관측장비를 1999년 10월부터 2001년 4월까지 설치, 운용하였다. 설치 위치 선정은 지형특성을 고려하여 산의 정상부근, 경사면, 과수재배단지, 평야지로 구분하여 설치하였다. 설치된 지역의 위도, 경도, 해발고도, 지표특성을 나타낸 것이 Table 1이다.

과수원단지 내에는 6 m 높이의 타워를 설치하고 지면에서 1, 2, 4, 6 m에 자연통풍형 방식 백색 플라스틱 재질의 radiation shelter(Model: 41002, R. M. Young, USA) 내에 온도, 습도센서(Model: HMP35C, Vaisala, Finland)를 설치하였다. 기온 측정센서는 thermistor이고, 풍향/풍속센서(Model: 05103, R. M. Young, USA)는 지면에서 6 m 높이에 설치하였다. 순복사 센서(Model: Q7, Radiation Energy Balance System, USA)는 지

Table 1. Location and land use of the observation sites at Hwashim-ri, Hadong-eup, Hadong-gun, Kyungnam province

Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Land Use
Site 1	35° 04' 43 N	127° 43' 37E	9	Pear orchard (plain)
Site 2	35° 04' 51N	127° 43' 40E	9	Pear orchard (plain)
Site 3	35° 05 08N	127° 43' 42E	6	Paddy(plain)
Site 4	35° 05' 26N	127° 43' 53E	53	Pear orchard (slope)
Site 5	35° 05' 33N	127° 43' 48E	103	Forest (slope)
Site 6	35° 05' 54N	127° 43' 37E	275	Forest (summit)

면에서 5 m 높이에 센서가 남쪽을 향하도록 수평을 유지하여 설치하였다. 토양 지중열류 센서(Model: HFT3, Radiation Energy Balance System, USA)는 지표면에서 2.5 cm 깊이에 수평으로 설치하였다. 일사량센서(Model: LI200X, Li-Cor, USA)는 지면에서 2 m 높이에 남쪽을 향해 수평으로 설치하였다. 강우량센서(Model: TE525MM, Texas Instrument, USA)는 지면에서 1 m 높이에 수평으로 설치하였다.

매분마다 측정된 값은 자료집록장치(Model: CR 10X-1M, Campbell Scientific, USA)에 저장하였다가 메시 정각에 평균 또는 누적값, 매일 자정에 일중 최고, 최저, 평균, 누적값을 저장하였다.

그 외의 각 측정지점에는 6 m 높이의 간이 타워를 설치하고 지면에서 1, 2, 4, 6 m 높이에 자연통풍형 방식 백색 플라스틱 재질의 radiation shelter 내에 온도, 습도 로거(Model: H08 Pro, Onset Computer Corporation, USA)를 설치하였다. 메시 정각에 측정된 값은 내장된 메모리에 저장을 하였다가 3개월에 한번씩 휴대용 컴퓨터를 이용하여 온도, 습도 자료를 수집하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 냉각률의 변화

야간의 기온변화는 냉각률(Cooling rate; C.R.)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Cooling rate} (^{\circ}\text{C/hr}) = \frac{T_s - T_r}{hr} \quad (1)$$

여기서 $T_s(^{\circ}\text{C})$ 는 전일 일몰시 기온, $T_r(^{\circ}\text{C})$ 는 당일의

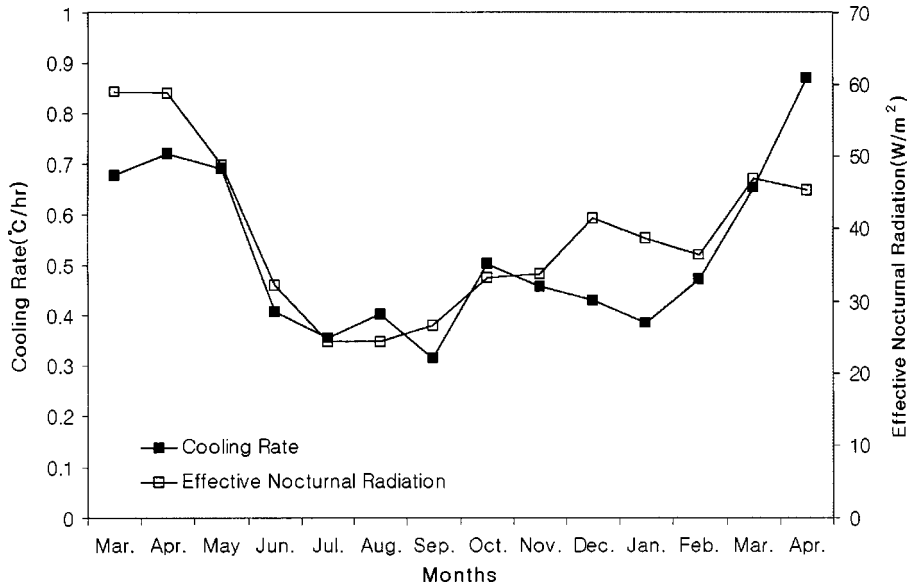


Fig. 1. Monthly variations of cooling rate and effective nocturnal radiation at Hwashim area from Mar. 2000 to Apr. 2001.

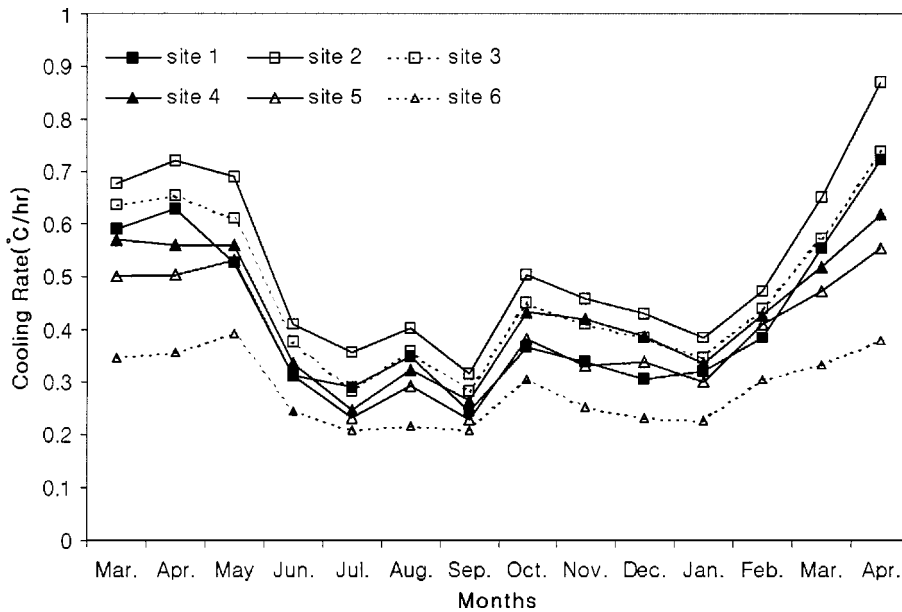


Fig. 2. Monthly variations of cooling rate at Hwashim area from Mar. 2000 to Apr. 2001.

일출시 기온, hr은 야간지속시간이다.

회심지역에서 2000년 3월부터 2001년 4월까지 main site(site 2)의 1 m 높이에서 월별 야간 평균 냉각률과 유효야간복사량(effective nocturnal radiation)의 관계를 나타낸 것이 Fig. 1이다.

냉각률은 10월과 4월에 가장 높아 0.5°C/hr, 0.7°C/hr

이상이었으며, 유효야간복사량은 봄에 60 W/m²로 높았고 다음으로 겨울에 40 W/m², 여름에 25 W/m² 정도로 최저를 보였다(Fig. 1).

2000년 3월부터 2001년 4월까지 각 site의 1 m 높이에서 냉각률을 나타낸 것이 Fig. 2이다.

산 정상(site 6)은 측정기간 동안 다른 site 보다

냉각률이 작고, 평지(site 2)는 냉각률이 크게 나타났다(Fig. 2). 관측기간동안 산 정상(site 6)에서 냉각률은 3, 4월에 0.4°C/hr, 그 외의 기간에는 0.2°C/hr 정도로 0.2°C/hr 정도의 차이를 보였고, 평지에서도 3, 4월이 가장 높아 0.7°C/hr, 9월에 가장 낮아 0.3°C/hr 정도로 0.4°C/hr의 차이를 보였다.

지형적 특성은 산 정상이나 경사면보다 평지의 복사 냉각이 흐트러지지 않는 지형에서 냉각률이 크게 나타났다. 시기별로는 3, 4월에 냉각률이 컸으며, 9월에 최저를 보이고 10월부터 커지는 경향을 나타내었다.

냉각률의 유효야간복사량 의존도는 풍속의 세기에 따라 site 2의 유효야간복사량과 1 m 높이의 기온의 관계를 화십지역에서 2000년 3월부터 2001년 4월까지의 일별 야간 평균자료를 이용하여 나타낸 것이 Fig. 3이다. Fig. 3(A)은 야간 평균풍속이 0.0~0.5 m/sec, Fig. 3(B)은 0.5~1.0 m/sec, Fig. 3(C)은 1.0~2.0 m/sec,

Table 2. The relationships of cooling rate and various meteorological elements for correlation coefficient.

Component	Number of Data	Correlation coefficient
Soil Heat Flux	366	0.26**
Wind Speed	366	0.03 ^{NS}
Effective Nocturnal Radiation < 20 W/m ²	61	-0.28 ^{NS}
20 < Effective Nocturnal Radiation < 40 W/m ²	147	-0.20 ^{NS}
40 < Effective Nocturnal Radiation < 60 W/m ²	77	-0.40*
Effective Nocturnal Radiation > 60 W/m ²	81	-0.64**
Effective Nocturnal Radiation	366	0.63**
WS < 0.5 m/sec	68	0.90**
0.5 < WS < 1.0 m/sec	137	0.77**
1.0 < WS < 2.0 m/sec	86	0.79**
WS > 2.0 m/sec	75	0.48**

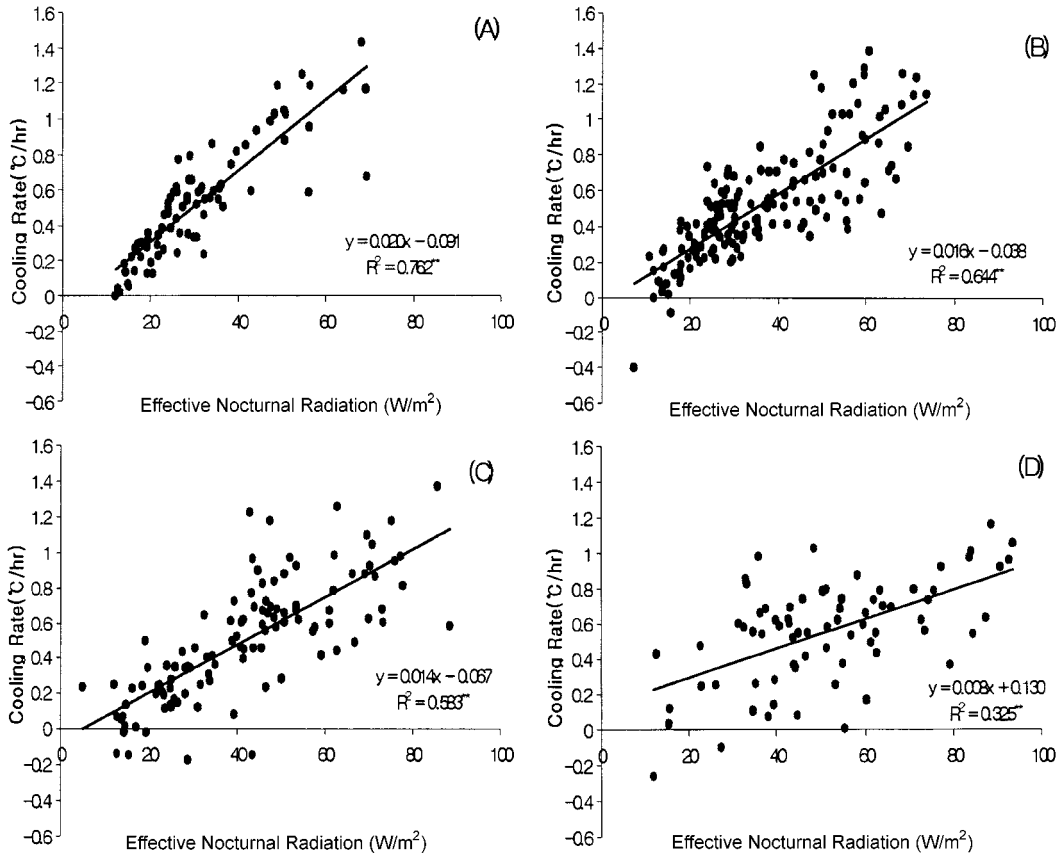


Fig. 3. The relationships of effective nocturnal radiation and cooling rate at Hwashim area from Mar. 2000 to Apr. 2001. Wind speed : (A) 0~0.5 m/sec, (B) 0.5~1.0 m/sec, (C) 1.0~2.0 m/sec and (D) more than 2.0 m/sec.

Fig. 3(D)은 2.0 m/sec 이상의 조건으로 나누었다.

각각의 풍속조건에서 회귀식의 기울기는 냉각률과 유효야간복사량의 의존도를 의미하는데, 풍속이 강해질수록 기울기는 낮아져 유효야간복사량과 냉각률의 관계가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 풍속이 0~0.5 m/sec로 약할 때, 결정계수가 0.76** 정도, 풍속이 강해지면 결정계수가 낮아져 2.0 m/sec 이상의 경우 결정계수가 0.32** 정도로 낮아졌다.

냉각률에 영향을 많이 미치는 기상요소를 알아보고자, 냉각률과 기상요소에 따라 상관관계를 구하여 나타낸 것이 Table 2이다.

냉각률과 주요 기상요소의 상관관은 지중열류량과 유효야간복사량에서 정의 상관을 보였고, 풍속은 부의 상관을 보였다. 냉각률은 지중열류량과 상관인 0.26** 정도이고 지중열류량이 냉각률에 주는 영향이 적었다. 풍속은 냉각률과 상관에 유의성이 없었으나, 유효야간복사량이 60 W/m² 이상의 조건에서 풍속과 냉각률의 상관은 -0.64정도이고, 고도의 유의성을 보여 유효야간복사량이 많을수록 풍속과 냉각률의 상관성이 높아졌다. 유효야간복사량과 냉각률의 상관은 0.63으로 고도의 유의성을 보였다. 특히, 풍속이 0.5 m/sec 이하의 조건에서 냉각률과 유효야간복사량은 상관인 0.90으로 고도의 유의성을 보였고, 풍속이 강해지면서 냉각률과 상관성이 낮아짐을 볼 수 있다(Table 2, Fig. 3).

냉각률에 영향을 많이 미치는 기상요소를 알아보고자, 냉각률과 기상요소에 따라 상관관계를 구하여 나타낸 것이 Table 2이다.

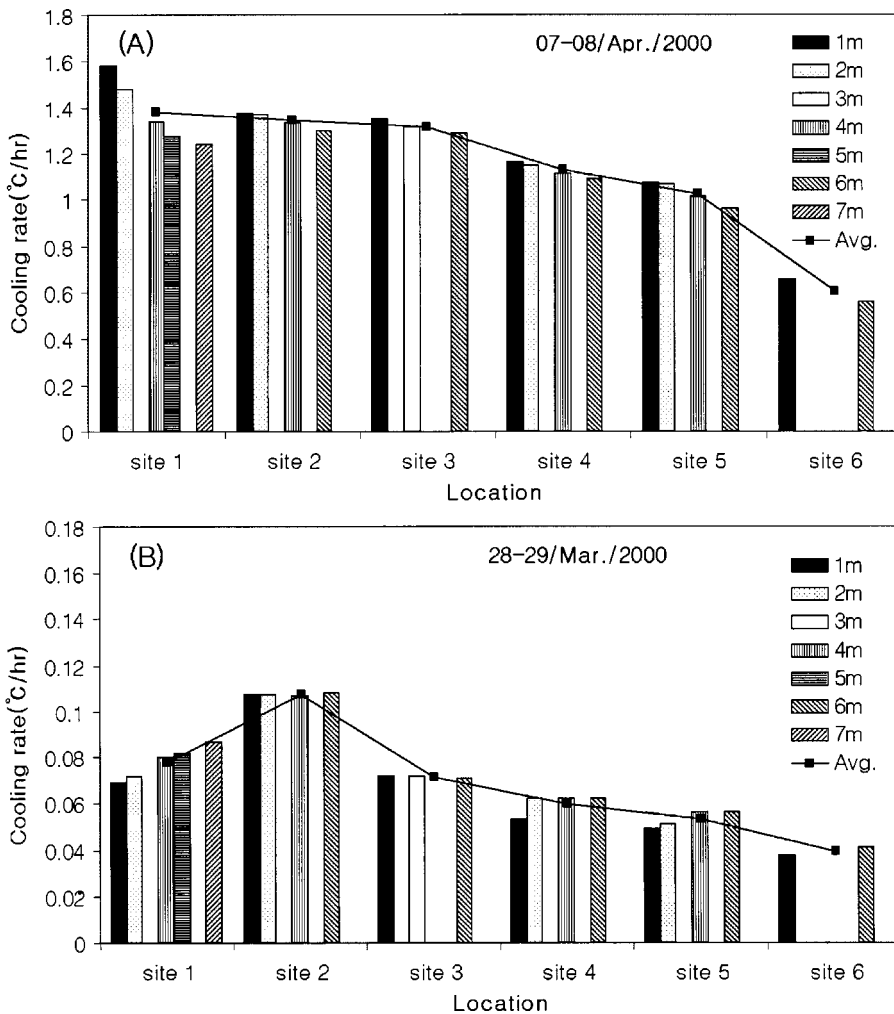


Fig. 4. Diurnal variation of cooling rate at each site at Hwashim area. (A) clear, calm (7-8 Apr.) and (B) cloudy, windy (28-29 Mar.) days in 2000.

즉, 풍속이 약한 경우 냉각률은 복사냉각 강도에 의존한다. 냉각률의 유효야간복사량 의존성은 풍속이 강해질 때 약해지는데, 이것은 강한 풍속에서 공기의 역학적 대류열(mechanical convective heating)의 증가를 의미하며, 바람이 강하고 유효야간복사량이 증가될 때 냉각률은 적어진다는 Nishiyama(1985)의 보고와 일치하였다.

전형적으로 맑고 바람이 잔잔한 날(2000년 4월 7~8일)과 바람이 불었던 날(2000년 3월 28~29일)을 선정하여 야간 냉각률을 나타내는 것이 Fig. 4이다.

맑은날의 냉각률은 평지(site 1, 2, 3), 경사면(site 4, 5), 산 정상(site 6)에서 각각 시간당 약 1.4°C, 1.2°C, 0.6°C 하강하였으며 산 정상부로 갈수록 냉각률이 작아지는 것으로 나타났다(Fig. 4(A)). 각 측정지점에서

서 높이별 야간 냉각률은 측정 높이가 높아질수록 낮아져, 최대 차이가 site 1에서 시간당 약 0.4°C 정도로 지표면부근에서 야간에 훨씬 기온이 하강됨을 알 수 있다. 바람이 불었던 2000년 3월 28~29일은 모든 측정지점에서 시간당 냉각률이 0.1°C 이하였으며, 냉각률이 가장 큰 측정지점은 site 2로 시간당 0.1°C 정도로 측정지점별 큰 차이는 없었다(Fig. 4(B)). 각 측정지점에서 높이별 야간 냉각률은 높이가 높아질수록 커지는 것을 볼 수 있다.

3.2. 서리발생일의 야간기상

맑고 바람이 잔잔한 날과 바람이 불었던 날에 전일 오후 6시부터 당일 오전 10시까지의 야간 기상에 대한 것이 Fig. 5이다.

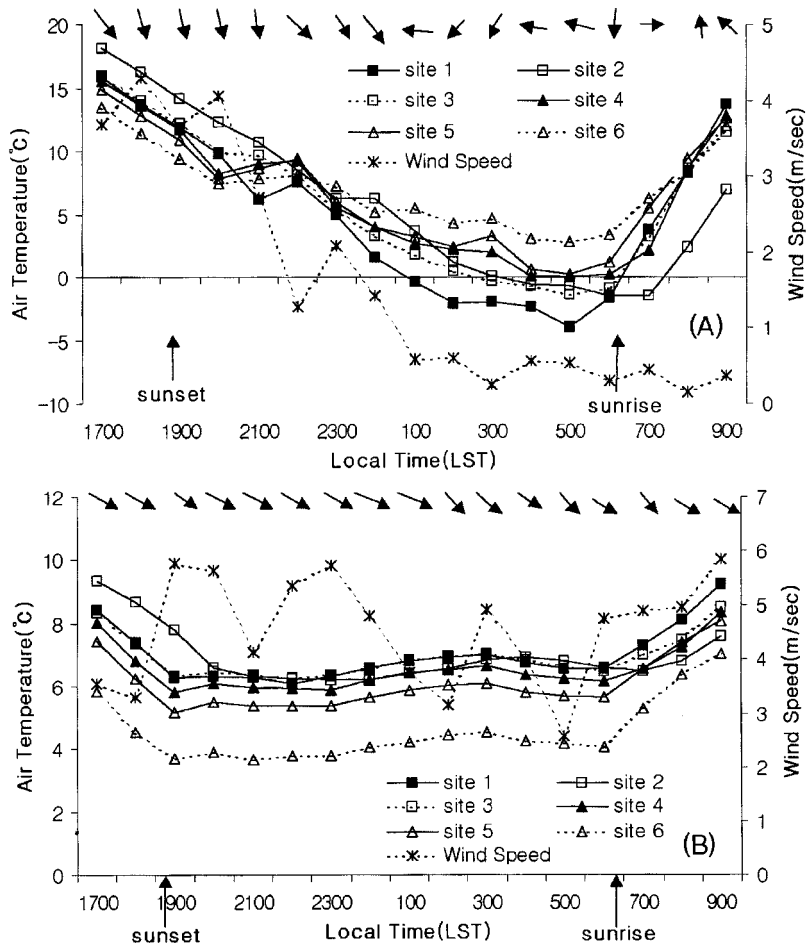


Fig. 5. Diurnal variation of wind and air temperature at Hwashim area. (A) clear, calm (7-8 Apr.) and (B) cloudy, windy (28-29 Mar.) days in 2000.

맑고 바람이 잔잔한 날은 일몰 전 풍속이 4 m/sec 정도로 강했으나 일몰 후부터는 바람이 점점 낮아져 0100부터 다음날 0900시까지 0.5 m/sec 정도로 잔잔하였다(Fig. 5(A)). 풍향은 초저녁에는 북서풍계열이 우세하였으며, 새벽에는 동풍계열의 바람이 우세하였다. 경사면(site 4, 5)에서 2200부터 2300까지 기온은 떨어지는 것이 아니라 오히려 기온이 상승하였는데, 이때의 평균풍속은 1.2~2 m/sec 정도였다. 이 때에는 아직 산 정상부(site 6)가 경사면이나 평지보다 기온이 낮았고 북서풍계열로 산 정상에서 경사면으로 바람이 불어 내려가는데, 이 현상은 차가운 공기가 아래쪽으로 흘러 내려오는 활강풍(katabatic wind)으로 판단된다. 활강풍의 영향으로 위쪽의 따뜻한 공기와 섞이게 되어 일시적으로 온도가 상승되었다(Manins and Sawford, 1979). Kalma *et al.*(1992)는 활강풍에 대해 다음과 같이 정리하였는데, 즉 방향은 독립적이고 그렇지만 해발고도가 높은 곳에서 아래로 흐르며 불룩한 지형은 흐름을 가속시키고, 이 바람은 지표근처 온도변화에 큰 영향을 준다. 그리고 풍속은 1m/sec를 초과하지 않는다고 하였다. 그러나 풍속은 경사의 길이에 따라 변하고, 경사의 길이가 길면 풍속은 커지게 된다(Thompson, 1986). 관측지점에 관계없이 야간 기온은 일몰 후부터 시간당 2°C 정도씩 하강하다가 자

정을 지나면서 해발고도 및 측정지점 주변환경에 의해 기온의 냉각률에 차이를 보이기 시작하여, 평지는 경사면이나 산 정상보다 냉각이 많았다. 이때부터 기온은 산 정상부가 경사면이나 평지보다 높았고 냉각이 경사면이나 평지보다 상대적으로 낮았다. 새벽에 풍속은 0.5 m/sec 정도였고, 지형 및 해발고도에 따라 기온의 편차는 커져 0600시 부근에 평지(site 1)가 산 정상(site 6) 보다 7°C 정도 낮았다. 일몰 후 야간이 시작되면 온도의 냉각은 급격히 진행되고 그 후에 점진적으로 낮아진다는 Bogren and Gustavsson (1991)의 보고와 일치하였다.

흐리고 바람이 강했던 날은 야간평균풍속이 4.7 m/sec 정도로 강했으며, 풍향은 북서풍계열이었다(Fig. 5(B)). 일몰 후부터 당일 일출 전까지 산 정상(site 6; 산림군락 내 관측)은 경사면(site 5; open) 보다 기온이 2.5°C 정도 낮았다. 그리고 해발고도가 낮아지면서 기온은 높아졌으나, 평지(site 1, 2, 3)에서 기온의 편차는 거의 없었다. 산 정상(site 6)에서 기온이 낮은 이유는 산림 내의 찬 공기가 나무들에 의해 공기의 난류를 감소시켜 나지 또는 개방된 지표면 위에서 보다 혼합이 적다는 Gross(1987) 보고와 일치하였다. 그리고 Kalma *et al.*(1983)과 Gustavsson(1995)은 산림군락내부에서 온도가 외부보다 높았다고 보고한 것과

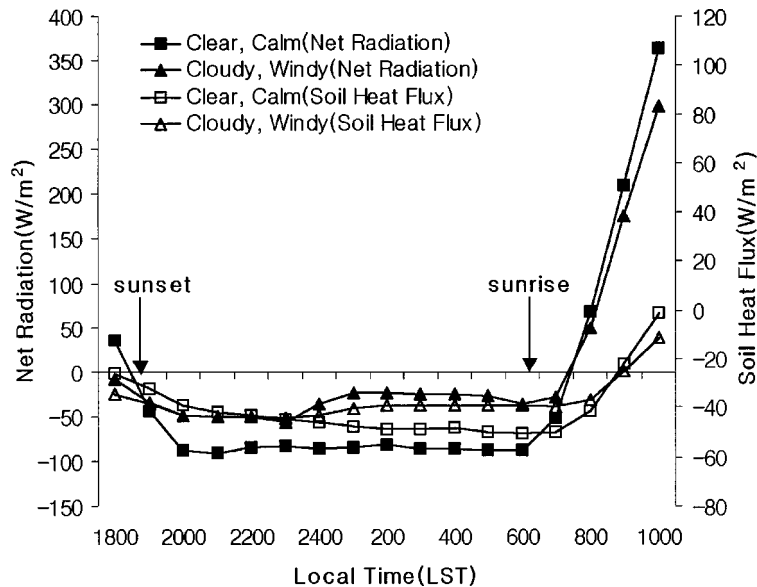


Fig. 6. Diurnal variation of net radiation and soil heat flux at Hwashim area on clear, calm (7-8 Apr.) and cloudy, windy (28-29 Mar.) days in 2000.

일치하는데, 이것은 산림군락 내에서 나무 등의 장애물에 의해 장파복사의 방출을 방해해서 냉각을 방해시켜 찬 공기 호수가 발달하지 못한다는 일반적인 개념과는 상이하다. 폐쇄된 지역에서 지표근처의 차가운 공기는 상위의 좀더 따뜻한 공기와 혼합을 방해하고, 식생의 방풍 효과는 바람이 잔잔했을 때보다 바람이 강했을 때 더 중요하다. 산림 내의 낮은 기온은 풍속에 대한 영향이 적다. 즉 산림 내의 축적된 차가운 공기는 숲이 바람을 차단하여 상대적으로 외부의 강한 풍속에서 찬 공기가 축적된다. 산림 내 지표근처의 낮은 온도 형성은 운동량(momentum)의 하향 이동을 식생의 군락이 외부공기의 유입을 차단해 주기 때문이다. 산림 내 지표근처에서는 복사냉각이 잘 일어나지만, 산림 내 낮은 온도는 풍속이 약할 때만 존재하게 된다. 바람이 잔잔할 때 개방된 지형에서는 난류가 존재하게 되어 차가운 공기와 차가운 공기 위층의 따뜻한 공기가 혼합되고, 산림 내에서는 방풍 효과와 마찰의 증가에 의해 난류가 감소하게 되는 것으로 판단된다. 이 결과로만 볼 때 바람이 강한 날 이류에 의해 서리가 맺히는 경우 과수의 채식 밀도에 관한 연구가 추후 검토되어야 할 것으로 판단되었다.

Fig. 6은 맑고 바람이 잔잔한 날과 흐리고 바람이 강한 날에 순복사와 지중열류량의 야간시간동안의 변화량을 나타낸 것이다.

맑고 바람이 잔잔한 날에 순복사는 일몰 후부터 부의 값이 나타나기 시작하였고 그 강도도 강해져 -100 W/m^2 정도로 일출 때까지 일정하였다(Fig. 6). 지중열류량은 야간동안 -50 W/m^2 이내의 값을 보였다. 흐리고 바람이 강한 날에 순복사는 일몰근처에 -50 W/m^2 정도였으나 자정을 지나면서 -30 W/m^2 내외의 값을 보였다. 지중열류는 야간동안에 -40 W/m^2 정도였으며 자정을 지나면서 약간 높아지는 것을 볼 수 있다.

IV. 적 요

본 연구는 경상남도 하동군 하동읍 화심리의 배 과수원에서 주변 지형 특성 및 해발고도별 서리 피해 상습지의 봄철 야간 냉각률, 특정일의 야간기상분포를 구명하고자 수행하였다.

냉각률은 평지에서 3, 4월이 가장 높아 0.7°C/hr , 9월에 가장 낮아 0.3°C/hr 정도로 0.4°C/hr 의 차이를 보였다. 일몰 후부터 일출 전까지의 야간기온 냉각률

과 유효야간복사의 상관은 $r = 0.63^{**}$ 였고, 풍속이 0.5 m/sec 이하에서 야간유효복사와 냉각률은 $r = 0.90^{**}$ 으로 상관성이 높았으며, 풍속이 강해지면서 냉각률과 상관관계는 낮아졌다. 맑았던 날의 냉각률은 평지(site 1, 2, 3), 경사면(site 4, 5), 산 정상(site 6)에서 각각 시간당 약 1.4°C , 1.2°C , 0.6°C 하강하여 산 정상으로 갈수록 냉각률이 작아졌다. 맑고 평균풍속이 $1.2 \sim 2 \text{ m/sec}$ 이며 산 정상이 경사면이나 평지보다 기온이 낮을 때, 2200~2300경에 경사면(site 4, 5)에서의 기온은 떨어지는 것이 아니라 오히려 상승하였다.

인용문헌

- Blennow, K., 1998: Modelling Minimum Air Temperature in Partially and Clear Felled Forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **91**, 223-235.
- Bogren, J., and T. Gustavsson, 1991: Nocturnal Air and Road Surface Temperature Variations in Complex Terrain. *International Journal of Climatology*, **11**, 443-445.
- Gross, G., 1987: Some Effects of Deforestation on Nocturnal Drainage Flow and Local Climate-A Numerical Study. *Boundary Layer Meteorology*, **38**, 315-337.
- Gustavsson, T., 1995: A Study of Air and Road Surface Temperature Variations during Clear Windy Nights. *International Journal of Climatology*, **15**, 919-932.
- _____, M. Karlsson, J. Bogren and S. Lindqvist, 1998: Development of Temperature Patterns during Clear Nights. *Journal of Applied Meteorology*, **37**, 559-571.
- Kalma, J. D., G. P. Laughlin, J. M. Caprio and P. J. C. Hamer, 1992: *The Bioclimatology of Frost: Its Occurrence, Impact and Protection*. Springer, Berlin, 144p.
- Lindqvist, L. and S. Lindqvist, 1997: Spatial and Temporal Variability of Nocturnal Summer Frost in Elevated Complex Terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, **87**, 139-153.
- Maki, M., T. Harimaya and K. Kikuchi, 1985a: Nocturnal Cooling Systems in Basin. (1) Heat Balance Analysis. In: *The Study of Mechanism and Quantitative Prediction of Occurrence of the Extraordinary Cooling in Boundary Layer as a Primary Factor of the Damage of Crops*. ed. by Kondo, Journal, Report of Research Group of Natural Disasters, No. A-60-4, 192-215 (in Japanese).
- _____, _____ and _____, 1985b: Nocturnal Cooling Systems in Basin. (2) Effects of Cooling Air Drainage. In: *The Study of Mechanism and Quantitative Prediction of Occurrence of the Extraordinary Cooling in Boundary Layer as a Primary Factor of the Damage of Crops*. ed. by Kondo, Journal, Report of Research Group of Natural Disasters, No. A-60-4, 216-232 (in Japanese).

- _____, _____ and _____, 1986: Heat Budget Studies on Nocturnal Cooling in a Basin. *Journal of Meteorology Society Japan*, **64**, 727-741.
- Manins, P. C. and B. L. Sawford, 1979: Katabatic Winds: A Field Case Study. *QJR Meteorology Society*, **105**, 1011-1025.
- Nishiyama, H., 1985: Minimum Temperature and Radiation Balance at Tateno. *Journal of Aerodynamic Observation Tateno*, **45**, 6-10 (in Japanese with English abstract).
- Thompson, B. W., 1986: Small-scale Katabatics and Cold Hollows. *weather*, **41**, 146-153.