

산사면의 한낮 기온분포에 미치는 이류효과 정량화

김수옥^{1**}, 윤진일²

¹국가농림기상센터, ²경희대학교 식물환경신소재공학과

Quantification of the Advection Effect on Midday Temperature Distribution over Mountain Slopes

S. O. Kim^{1*}, J. I. Yun²

¹National Center for Agro-Meteorology, Seoul National University

²College of Life Sciences, Kyung Hee University

I. 서 언

기후변화로 인해 폭염과 열대야 등의 고온관련 기상이변이 더 증가될 것으로 전망되며, 이로 인한 농작물의 수확량 감소, 생리장해 및 과실의 품질 및 착색의 불량 등 작물의 피해 증가가 예상된다. 기상청에서 제공하는 일 최고기온 정보는 작물의 고온장해 대비를 위해 유용히 사용될 수 있으나, 제공자료의 분해능은 사방 5km 로서 산간지에서는 실제 온도와 큰 차이가 발생할 수 있는데, 사면과 태양위치 간 기하학적 관계로 인한 수광량(surface irradiance) 차이의 영향을 받기 때문이다 (Seo *et al.*, 2008; Chung *et al.*, 2009; Kim and Yun 2013). 일 최고기온 결정에 미치는 일사수광량 효과를 정량화하기 위해 많은 연구가 진행되었는데, 대체로 1100 부터 1500 까지 4시간 동안의 수평면에 대한 경사면의 수광량편차와, 수평면에 대한 경사면의 기온편차 간 관계식을 도출하는 방안이 주종을 이루었다 (Yun 2004; Chung *et al.*, 2007; Chung *et al.*, 2009; Kim and Yun, 2013). 이들 방법은 고해상도 전자기후도 제작에 많이 활용되었으나 ‘실황에 준하는’ (near-real time) 매일의 최고기온 추정에도 적용할 수 있는지 검토된 적은 없다. 또한 사면 일사수광량 편차 외에도 지표 부근의 한낮기온 결정요인으로써 이류의 영향을 들 수 있는데, 한낮에 사면에서 가열된 공기주머니가 바람에 의해 열특성이 다른 공기주머니들과 빠르게 섞여 기온상승분이 무풍일에 비해 낮아지는 상황을 가정할 수 있다. 때문에 고밀도 검증관측망에서 수집된 복잡지형 집수역의 일 최고기온과 풍속을 이용, 이 가설을 검증하였고, 선행연구에서 제시한 일사효과 기반 최고기온 추정모형에 바람효과를 추가함으로써 일 최고기온 추정방법을 개선하였다.

II. 재료 및 방법

* Correspondence to: tolee7785@hanmail.net

2.1. 기상자료 수집 및 분석

연구대상지역으로서 지리산 국립공원 남쪽의 악양집수역(경남 하동군 악양면)을 선정하고, 해발 10~325m 고도 범위의 10개 지점에 설치된 무인기상관측기(STA Corporation, Korea)로부터 2012년 1월부터 2013년 12월까지 2년간 1분단위 기온과 풍속 자료를 수집하였다 (Fig. 1). 10곳의 기상관측지점은 남북으로 흐르는 하천을 사이에 두고 서향사면과 동향사면에 고루 분포하고 있어 한낮의 일사량과 기온의 차이를 확인하기에 적합하다. 연구대상지역에 가장 가깝고 위도가 유사한 기상관측소는 진주기상대로, 이곳의 시간단위 일사량과 운량 자료를 수집하였다. 10개 지점에서 수평면 일사량을 관측했지만 측기의 정밀도와 정확도가 기상관측소의 표준측기보다 낮고 지점별로 주변 장애물 유무와 위치 등 관측여건이 다르기 때문에 지점 평균값을 사용하지 않고 진주기상대의 일사량을 연구대상지역의 수평면 일사량으로 간주하였다. 지점별 사면 일사수광량은 1100부터 1500까지 매시간 적산된 진주 수평면 일사량으로부터 Kondratyev and Federova (1977)의 방법에 의해 계산하였다. 이 과정에서 경사도 및 경사향은 가로×세로 30m 해상도의 DEM 격자로부터 반경 750m의 구역을 평활화 한 것으로 사용하였다 (Kim and Yun, 2013). 운량의 경우, 1200부터 1500까지 4시간의 값을 평균하여 평균 운량이 1이하인 날과 9이상인 날을 선별, 각각 맑은 날과 흐린 날 구분에 이용하였다.

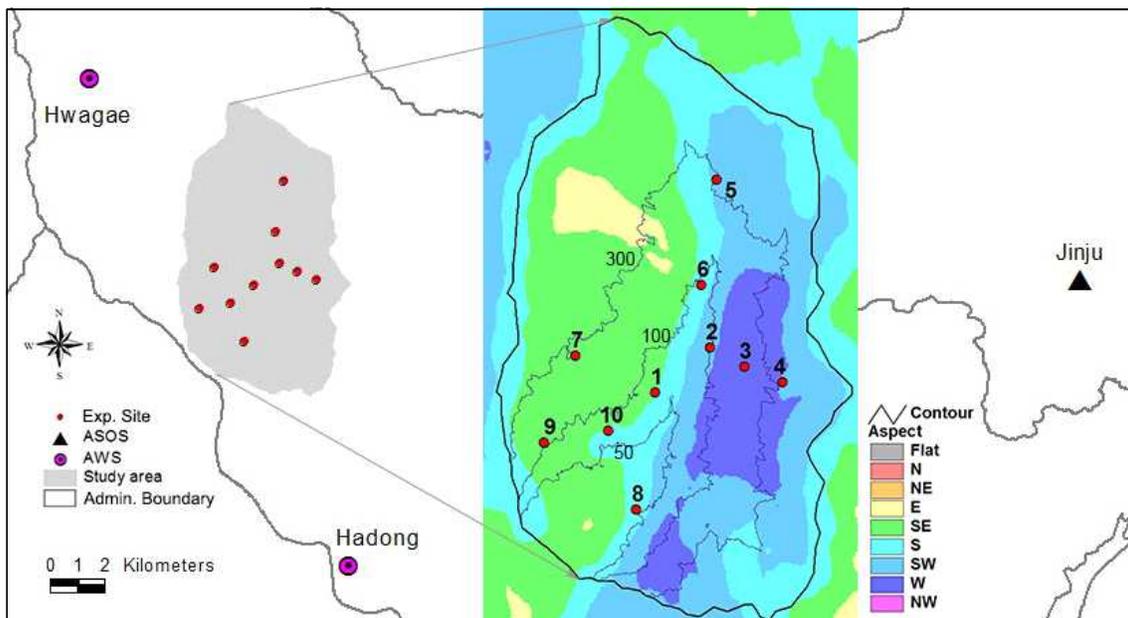


Fig. 1. Slope aspect map of the study area smoothed to the radius of 750m. Locations of 10 validation sites, 2 of the Korea Meteorological Administration (KMA)'s automated weather stations (AWS), and the nearest KMA office (ASOS) are depicted on the background map

검증관측망의 자료를 이용하여, 해발고와 경사도 조건은 비슷하나 경사향만 다른 두 사면간의 맑은 날 및 흐린 날의 일사수광량과 기온을 비교하였다. 또한 악양집수역 인근의 기상청 AWS인 화개와 하동에서 관측된 1500기온의 평균값을 10곳 검증지점의 배경기온으로 두고, 두

AWS 지점 평균고도와 연구대상지역 30m 격자의 DEM으로 표현된 지형간 고도편차를 기온감률(-0.9°C/100m)에 의해 보정하여 각 지점의 국지기온을 추정하였다. 선행연구에서는 해발고도 보정만을 수행한 일 최고기온 추정값과 실제 관측기온 간에 발생한 오차는 주로 일사효과인 것으로 판단하였으나, 본 연구에서는 일사효과를 이류, 즉 풍속에 의해 보정해야만 현실에 가까운 결과를 얻을 것으로 가정하였다. 이 오차와 풍속간의 관계를 살펴보기 위해, 선별된 맑은 날(2012년 75일, 2013년 102일)에 대하여 단순 해발고도 보정을 통한 추정기온과 실측기온 간 지점 평균 추정오차를 계산한 다음, 동일 기간의 4시간(1100-1500) 평균풍속과 비교하였다.

2.2. 일 최고기온 모형

캐나다 산림청 BioSIM 모형에서는 임의 사면의 1100부터 1500까지 4시간 동안의 적산 일사수광량(ϕ_t)과 수평면일사량(ϕ_0) 간 편차에 북반구에서 관찰되는 오후 4시간 적산 일사량의 최대편차($\Delta\phi_{max}$, 15MJ/m²)로 표준화한 과열지수(overheating index)를 이용, 일 최고기온의 일사효과를 정량적으로 추정할 수 있다. Chung *et al.*(2009)는 과열지수 대신, 표준수광지수(χ , normalized slope irradiance)를 이용하여 다양한 경사면과 수평면 간 최고기온 편차, 즉 일사수광량에 의한 추정기온 보정량(C_f)을 표준수광지수 χ 의 이차함수로 표현하였다(식 2).

$$\chi = \frac{\phi_t - \phi_0}{S} \quad (1)$$

$$C_f = 56\chi^2 + 20\chi + 0.6 \quad (2)$$

식 (1)에서 S는 청천일사량(clear sky radiation)으로, 동일한 수광량 편차일지라도 여름철보다 겨울철에 낮기온 상승 기여도가 클 것으로 가정한 것이다.

경사면이 수평면에 비해 더 가열되어 사면에 인접한 공기주머니의 온도가 상승하더라도 그 자리에 머물러 있지 못하고 이동한다는 것은 충분히 예견되는 사실이다. 이때 큰 규모의 공기주머니가 연직상방으로 이동하는 대류의 경우 일사수광량 편차에 의해 추정되는 기온상승효과가 지속되겠지만, 만약 주변으로부터 열특성이 다른 공기주머니가 이류에 의해 기존 공기주머니를 밀어내거나 섞일 경우에는 일사효과의 감쇄가 예상된다. 이를 반영하여 표준수광지수(χ)를 이용한 기온보정계수 C_f 를 이류가 전혀 없는 조건에서 기대할 수 있는 일사효과의 최대값으로 간주하였다. 이류가 있는 경우는 수평풍속에 따라 가중치를 적용함으로써 일사효과 보정계수를 조정하는 방안을 도출하였다. 풍속가중치(f)는 해당 경사면의 표준수광지수 계산과 동일한 4시간(1100 - 1500) 동안 평균풍속($\bar{\nu}_4$)을 변수로 둔 다음 식으로 모의하였다.

$$f = e^{-1.2\bar{\nu}_4} \quad (3)$$

표준수광지수 기반의 일사효과 모형에 바람효과를 결합하여 2012년 12월부터 2013년 2월까지

운량 1 이하인 맑은 날에 대해, 악양집수역 10개 검증지점의 1500기온을 추정하였다. 비교를 위해, 비교를 위해 풍속효과를 적용하지 않은 기존 일사효과모형에 의한 기온과, 일사효과 보정을 하지 않은 1500 기온을 추정하였다. 이들과 검증관측망의 실측기온을 비교하여 각 모형의 ME (mean error)와 RMSE (root mean square error)를 계산하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 사면 간 기온과 일사량의 관계

2012년 중 전운량 1이하가 기록된 75일에 대하여 검증관측지점 중 고도가 300m정도로 비슷한 5번(서향사면)과 7번(동향사면)의 1500 기온은 5번에서 평균 1.5℃ 더 높았는데, 흐린 날 76일 간의 두 지점간 기온 편차는 평균 0.1℃에 불과하였다. 서향사면 4번 지점은 7번에 비해 표고가 40m 가량 더 높은 곳이긴 하나 7번에 비해 맑은 날 기온이 평균 0.7℃ 더 높았다. 흐린 날의 기온 편차는 평균 -0.3℃로서 고도에 따른 기온감률이 반영된 것으로 볼 수 있다. 표고 100m 급의 두 지점 2번(서향사면)과 9번(동향사면)에서도 맑은 날 1500 기온 편차는 역시 2번에서 평균 0.4℃ 더 높았다. 같은 지점들의 맑은 날 1100 ~ 1500 (4시간) 누적 사면 일사수광량을 비교해 보면 기온편차가 가장 컸던 5번과 7번 사이에서 수광량 편차가 거의 2MJ/m²에 가까울 정도로 큰 것으로 나타났다. 나머지 경우에도 모두 동향사면에 비해 서향사면 쪽의 일사 수광량이 더 큰 것으로 나타나 1500 기온의 지점 간 편차와 사면 일사수광량 간 상관관계가 있음을 확인하였다(Fig. 2).

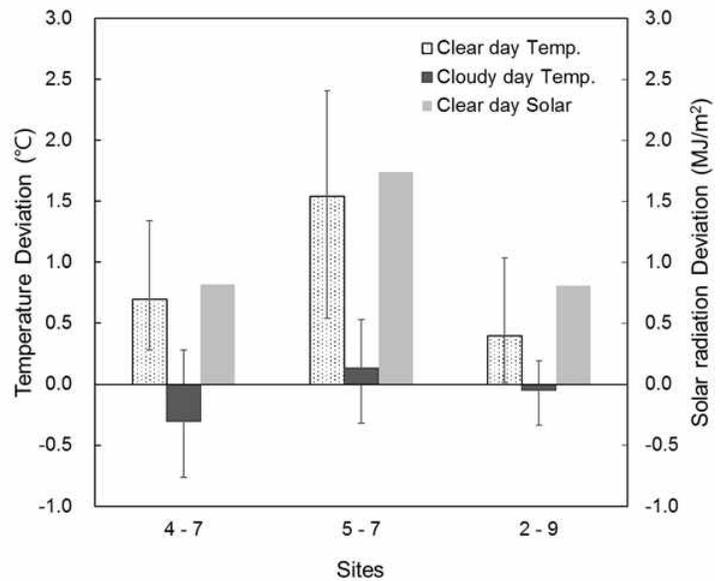


Fig. 2. Observed temperature differences represented by the mean and standard deviation among sites with contrasting slope aspect at 1500 on clear and cloudy days (site 2, 4, 5 on west facing and 7, 9 on east facing slopes). The 4-hour (1100 - 1500) cumulative solar irradiance on clear days is also shown for the comparison.

3.2. 일사효과와 풍속 관계

맑은 날 악양집수역의 1500 배경기온에 해발고도 보정만을 수행한 추정기온과 실측기온 간

기온오차의 지점별 평균치는 동일기간의 4시간 평균풍속과 반비례 관계를 나타내었다 (Fig. 3). 풍속이 강해질수록 추정오차는 점차 감소하여 일정 풍속 이상에서는 기온오차 내에 포함되어 있는 일사효과가 거의 사라지게 될 것임을 유추할 수 있다.

검증지점 10곳에 대하여, 1500 기온추정오차를 실측값과 비교한 결과, 단순 고도보정의 경우 기온추정 오차(ME)는 평균 -0.87°C 로 전반적으로 과소추정이었으며, 특히 서향 사면에 위치한 3~5번 지점과 저지대이나 완만한 남사면에 해당하는 6번 지점에서 이런 경향이 심했다 (Table 1, Lapse). 기존의 표준 수광지수 모형으로 추정된 기온은 ME 1.0°C 으로서 실측기온에 비해 전반적으로 높았다 (Table 1, NDSI). 이에 비해 바람효과를 결합한 새로운 모형에 의해 추정된 기온은 ME가 -0.23°C 로 편기성이 크게 개선되었으며, 이 같은 효과는 특히 남·서향의 사면에서 크게 나타났다 (Table 1, NDSI+U).

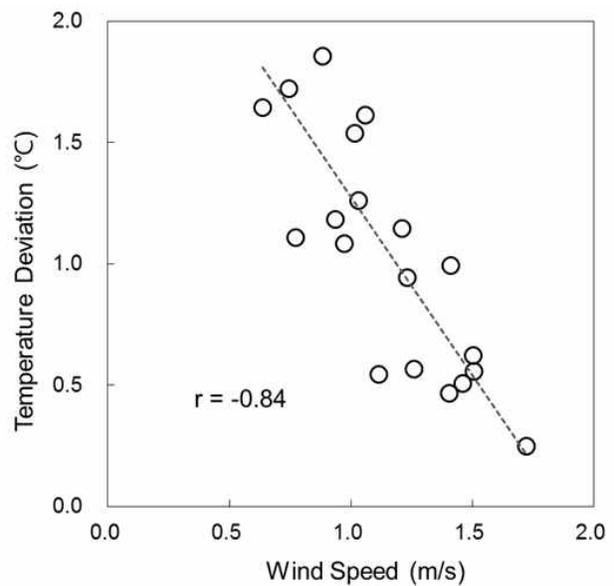


Fig. 3. Relationship between the lapse-rate corrected 1500 temperature estimation error and the 4-hour (1100 - 1500) mean wind speed.

Table 1. The error statistics for 1500 temperature estimated by the lapse-rate corrected (Lapse), the solar-effect corrected (NDSI), and the NDSI plus wind speed corrected (NDSI+U) models. Clear day data in 2012-2013 were used

		Weather sites										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	AVG
Lapse	ME	-0.33	-0.73	-1.49	-1.10	-1.36	-1.49	-0.29	-0.97	-0.40	-0.52	-0.87
	RMSE	0.78	1.09	1.71	1.37	1.63	1.69	0.81	1.33	0.88	0.93	1.22
NDSI	ME	1.24	1.24	0.05	1.69	1.77	0.69	1.83	0.08	0.60	0.98	1.02
	RMSE	1.80	1.86	1.35	2.19	2.36	1.65	2.49	1.23	1.43	1.63	1.80
NDSI+U	ME	0.01	-0.25	-0.78	-0.11	0.09	-0.57	0.15	-0.55	-0.17	-0.08	-0.23
	RMSE	0.76	0.90	1.34	0.95	1.34	1.15	0.82	1.08	0.82	0.84	1.00

ME: mean error, RMSE: root mean square error

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ010007)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인용문헌

- Chung, U., K. H. Lee, and J. I. Yun, 2007: Performance of northern exposure index in reducing estimation error for daily maximum temperature over a rugged terrain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 9(3), 195-202.
- Chung, U., H. C. Seo, J. I. Yun, S. J. Jeon, K. H. Moon, H. H. Seo, and Y. S. Kwon, 2009: Extrapolation of daily maximum temperature in a mountainous terrain. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 45, 473-482.
- Kim, S. O., and J. I. Yun, 2013: Relationship between midday air temperature and solar irradiance over sloping surfaces under cloudless conditions. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 15(4), 291-297. (In Korean with English abstract) doi:10.5532/KJAFM.2013.15.4.291
- Kondratyev, K. Y., and M. P. Federova, 1977: Radiation regime of inclined slopes. WMO Technical Note No. 152pp.
- Regnier, J., 1996: generalized approach to landscapewide seasonal forecasting with temperature-driven simulation models. *Environmental Entomology* 25(5), 896-881
- Seo, H. C., S. J. Jeon, and J. I. Yun, 2008: Azimuthal distribution of daily maximum temperature observed at sideslopes of a grass-covered inactive parasitic volcano (“Ohreum”) in Jeju Island. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 10(1), 25-31. (In Korean with English abstract)
- Yun, J. I., 2004: Visualization of local climates based on geospatial climatology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 6(4), 272-289. (In Korean with English abstract)