

## 냉기호 형성 집수역의 일 최저기온 분포에 미치는 바람효과

김수옥<sup>1</sup> · 김진희<sup>1</sup> · 김대준<sup>1</sup> · 윤진일<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(재)국가농림기상센터, <sup>2</sup>경희대학교 생태시스템공학과

(2012년 11월 27일 접수; 2012년 12월 9일 수정; 2012년 12월 10일 수락)

## Wind Effect on the Distribution of Daily Minimum Temperature Across a Cold Pooling Catchment

Soo-Ock Kim<sup>1</sup>, Jin-Hee Kim<sup>1</sup>, Dae-jun Kim<sup>1,2</sup> and Jin I. Yun<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>National Center for Agro-Meteorology, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>2</sup>College of Life Sciences, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

(Received November 27, 2012; Revised December 9, 2012; Accepted December 10, 2012)

### ABSTRACT

When wind speed exceeds a certain threshold, daily minimum temperature does not drop as predicted by the geospatial model in a cold pooling catchment. A linear regression equation was derived to explain the warming effect of wind speed on daily minimum temperature by analyzing observations at a low lying location within an enclosed catchment. The equation,  $Y=2X+0.4$  ( $R^2=0.76$ ) where Y stands for the warming ( $^{\circ}C$ ) and X for the mean horizontal wind speed (m/s) at 2m height, was combined to an existing model to predict daily minimum temperature across an enclosed catchment on cold pooling days. The adjusted model was applied to 3 locations submerged in a cold air pool to predict daily minimum temperature on 25 cold pooling days with the input of simulated wind speed at each location. Results showed that bias (mean error) was reduced from -1.33 to -0.37 and estimation error (RMSE) from 1.72 to 1.20, respectively, in comparison with those from the unadjusted model.

**Key words:** Cold air pool, Catchment, Daily minimum temperature, Slope wind, Geospatial climatology

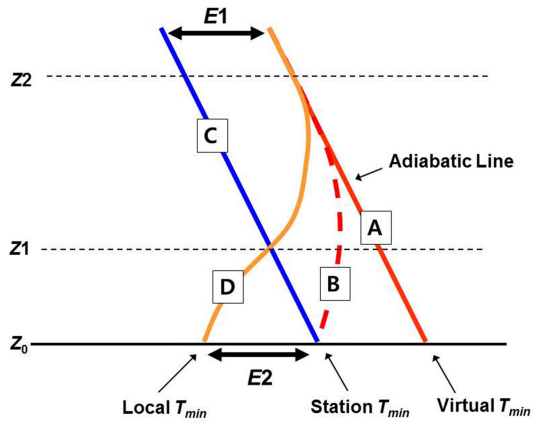
### I. 서 론

과수원이 냉기호(cold air lake) 지대에 위치하면 겨울철 수체의 동해, 봄철 꽃눈의 서리피해로 등으로 인한 수목의 피해는 물론 재배농가의 경영손실이 발생하기 쉽다. 냉기호가 자주 형성되는 곳의 국지기후는 종관기후와 큰 차이를 나타낼 수 있고 서식하는 동식물의 생태반응 또한 주변의 평균값을 벗어나기도 한다(Daly *et al.*, 2009). 따라서 냉기호 지대의 야간기온 특히 일 최저기온 추정은 농업기상학의 오래 된 과제이다(Stigter, 2010). 현실적으로 가장 유망한 추정기술

은 기상관서에서 관측한 최저기온을 냉기호 지대의 지표특성(주로 GIS 공간정보 이용)에 따라 보정하는 것인데, 경작지 규모가 크고 지형이 단순한 외국에서는 관심이 덜한 반면 규모가 작고 지형이 복잡한 국내에서는 최근 관련분야 연구에서 괄목할 만한 성과를 거두고 있다(Yun, 2010). 이들 중 널리 쓰이는 것은 야간 지표복사로 인한 찬 공기 배수효과를 토대로 한 것으로, 이 때 집수역의 출구 부근이 도로, 제방 등 인공구조물에 의해 폐쇄된 경우 찬 공기가 집적되는 냉기호 효과를 반영하는데 이 기술의 개요는 다음과 같다(Chung *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2011).



\* Corresponding Author : Jin I. Yun  
(jiyun@khu.ac.kr)



**Fig. 1.** Hypothetical profiles of minimum temperatures caused by the nocturnal radiative cooling. Curve A represents a standard profile formed by an adiabatic lapse rate and bends towards the land surface by radiative cooling of *in situ* air over the synoptic station, forming curve B. Sites in topographically complex regions have cold air inflow from the surrounding area in addition to the cooling of *in situ* air, forming profile D.  $E1$  and  $E2$  represent estimation errors expected from a typical spatial interpolation method using profile C due to the additional cooling and the so-called thermal belt effect, respectively (Adopted from Chung *et al.*, 2006).

냉기호 지대는 청명미풍의 야간에 지표 복사냉각에 의해 쉽게 기온역전이 발생한다. 기상관서로부터 배경 기온(reference temperature)을 얻어 표준대기온감률( $-0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ )에 따라 고도가 다른 지점의 기온을 추정하는 것이 일반적이는데, 복사냉각으로 온도가 내려간 지표면의 기온 관측값을 배경기온으로 삼는다면 고도가 높은 곳은 실제 기온보다 더 낮게 추정된다. 이러한 추정오차를 보정하는 것이 온난대 효과( $E1$ )로서(식 1), 표준유역 기저( $Z_0$ )로부터 일정 고도( $Z1$ ) 이상에서 적용하며 최대역전강도( $I_{max}$ )에 도달할 때까지 고도( $Z$ )에 따라 증가한다(Fig. 1).  $Z1$ 은 테더존데(tether sonde) 등 경계층 관측장비에 의해 직접 확인할 수 있으며 계곡 기저로부터 대체로 200m 정도이다. 또한 내륙산간지역과 같은 복잡한 지형에서는 야간에 차가워진 공기가 사면을 타고 흘러내려 저지대에 집적되고 이 일대의 기온이 하강하게 되는데, 이것을 냉기집적효과( $E2$ )로 표현한다. 경사를 따라 이동하고 집적되는 냉기량은 찬 공기의 흐름(cold-air drainage)이 물의 흐름과 동일하다는 가정 하에 GIS 수문함수를 이용해 30m 격자단위로 모의한다. 주어진 격자에 유입되는 냉기량은 반경 150m 안에 포함되는 주변 격자의 냉기유입량 평

균값( $FA_5$ )으로 평활화하는 과정을 거치며,  $FA_5$  값이 가지는 냉기효과는 로그함수로 나타낼 수 있다(식 2).

$$E1 = \left(\frac{R}{R_{max}}\right) \cdot I_{max} [1 - \exp\{-0.01(Z-Z1)\}] \quad (1)$$

$$E2 = \left(\frac{R}{R_{max}}\right) \cdot \log_{10}(FA_5) \quad (2)$$

지표면의 복사냉각속도는 야간 운량과 풍속, 전날 일사량 등에 의해 달라지므로 기상조건은 냉기집적 및 온난대 효과에 영향을 미친다. 이를 반영하기 위해 전 날 최고기온과 당일 아침 최저기온 간 일교차( $R$ )와 기후학적인 기온일교차 최대값( $R_{max}$ )에 의해  $E1$ 과  $E2$ 를 조정한다.

출구가 도로나 제방에 의해 막힌 폐쇄 집수역(enclosed catchments)에서는 찬 공기가 원활하게 배수되지 못하고 고여 있는 현상을 보정한다. 이것은 냉기호에 해당하는  $Z1$  이하 지역에 대해 고도별 냉기 집적량( $CAP_i$ )을 계산하여 기존의  $FA_5$ 에 합산함으로써 해결할 수 있다(Kim *et al.*, 2011). 즉  $Z1$ 보다 높은 지역은 냉기류( $FA_5$ )만으로 표현하고,  $Z1$  이하는 계곡 사면을 따라 흘러내린 찬 공기로 형성된 냉기호의 냉기 집적량( $CAP_i$ )을 합산함으로써 기온하강분( $E2$ )을 표현한다(식 3).

$$E2 = \left(\frac{R}{R_{max}}\right) \cdot \log_{10}(FA_5 + CAP_i) \quad (3)$$

여기서  $CAP_i$ 는 임의고도  $Z_i$ 에 작용하는 냉기집적량으로서 다음 식으로 추정된다.

$$CAP_i = CAP_0 \cdot \exp\left(-\frac{Z_i - Z_0}{H}\right) \text{ for } (Z_i - Z_0) \leq Z1 \quad (4)$$

여기서  $CAP_0$ 는 냉기호 기저( $Z_0$ )에서의 냉기집적량으로서 집수역의 실제지형과 냉기호 수면 높이( $Z1$ ) 간 고도편차( $\Delta Z$ )를 냉기호 면적( $\text{m}^2$ )과 곱하여 얻어지는 저수용량과, 냉기집적량( $FA_5$ )을 부피단위로 환산한 집수역 냉기집적총량 간 비율로부터 계산된다.  $H$ 는  $CAP_i$ 가  $CAP_0$ 의 37%로 줄어드는 고도(scale factor)이다.

저지들은 이 방법을 지리산국립공원 남측 북북동-남남서 방향으로 형성된 폐쇄 집수역(면적  $53\text{km}^2$ , 해발 고도 범위 6~1,117m)인 악양계곡에 적용하여 최저기온분포를 추정하고 그 결과를 실측 기온자료 및 적외선 열영상자료 등과 비교하여 기존 방법에 비해 추정

오차가 크게 개선되었다고 보고하였다(Kim *et al.*, 2011). 하지만 2012년 5월 17일 수행된 이 실험 이후 냉기호 중심 부근에 자동기상관측장비를 설치하여 지속적으로 관측한 결과 기온 실측치가 예측치보다 높은 경우가 발생하는 것을 발견하였다. 그 원인을 밝히기 위해 계곡의 양쪽 사면에서 흘러내리는 서로 다른 풍향의 사면 활강류가 계곡 바닥에서 수렴되는 과정에서 상부의 따뜻한 공기가 냉기호 내부로 혼입되어 냉기호 효과를 상쇄한다는 가설을 세우고 검증실험을 수행하였다. 이 단보에서는 검증실험으로부터 얻은 결과 중 실용적인 의미가 있는 부분을 먼저 보고하고, 기존 냉기호 지대 최저기온 추정에 쓰이던 방법을 신속히 개선하는 데 도움을 주고자 한다.

## II. 자료수집 및 기온-풍속 경험식 도출

냉기호를 대표할 수 있는 지점의 기상자료를 얻기 위해 선행연구를 통해 상습 냉기호 형성지대로 알려진 악양계곡 기저부(속칭 '무덤이들', station 1)에 무인기

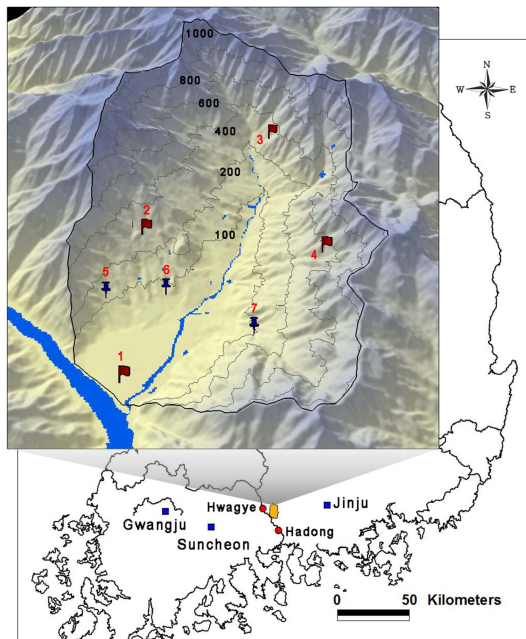


Fig. 2. Location map of Akyang valley. Numbers represent: 1 for reference station; 2, 3, and 4 for wind stations; 5, 6, and 7 for validation stations, respectively. Upper air station (Gwangju), nearest synoptic stations (Jinju and Suncheon) and AWS (Hwagye and Hadong) are also located on the national map.

상관측장비(SL100, STA Corporation, Korea)를 설치하여 2011년 6월 1일부터 2012년 5월 31일까지 365 일 간 기온, 일사, 강수, 풍향, 풍속을 1분 간격으로 측정하고, 로거에 저장된 자료를 CDMA 방식으로 10 분에 한 번씩 수집하였다. 냉기호의 '수면높이'(Z1)를 벗어난 계곡 서쪽 사면에 위치한 농장('햇차원' 해발 276m, station 2), 동쪽 사면의 사찰('금봉사' 해발 326m, station 4), 북쪽 사면의 사찰('수곡사' 해발 284m, station 3)에서 풍속과 풍향을 측정하여 역시 10분 간격으로 수집하였다(Fig. 2).

분석 대상일은 맑은 날씨 및 사면 활강류 수렴 등 두 조건을 만족하는 날짜로서, (1) 맑은 날 기준은 인근 기상관서(경남 진주, 전남 순천)의 0600LST 전운량이 0.5 미만이고, 무덤이들의 일교차가 13°C 이상인 경우이며, (2) 찬 공기 수렴 조건으로는 0501-0600LST 사면 활강류의 풍향이 계곡 기저를 향하는 것으로, 2번 지점(경사향 동남동)은 서풍계열(WNW~N)이며 3번과 4번 지점(경사향 남서)은 동풍계열(NNE~ESE)일 때이다. 이 두 조건을 만족하는 날은 1년 중 25일로서 각 날짜에 대해 Kim *et al.*(2011)의 방법에 의해 무덤이들 지점의 0501-0600LST 한 시간 평균기온을 추정하였다. 이때 악양계곡의 배경기온으로는 기상청 방재기상관측망(AWS) 가운데 악양과 가장 가까운 곳인 화개(지점번호 906)와 하동(지점번호 932) 두 지점의 평균값을 사용하였다(Fig. 2).

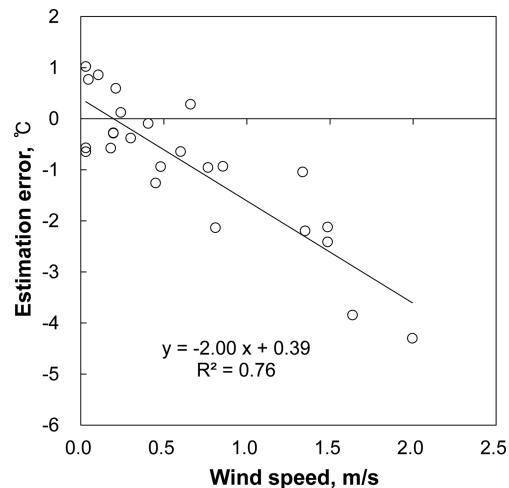


Fig. 3. Relationship between the temperature estimation error and the wind speed observed at the reference station (number 1 in Fig. 2) in the early morning (0501-0600LST) of 25 cold pooling days.

이렇게 해서 추정된 25일간의 기온을 실제 측정된 기온과 비교하여 추정오차를 산출하고 이를 같은 시간대의 풍속과 비교한 결과, 바람이 강해질수록 추정오차가 커지는 경향이 뚜렷하였다(Fig. 3).

이 오차를 풍속변수로 두고 같은 시간대 실측 풍속을 독립변수로 두어 기온추정오차에 대한 바람의 영향을 경험식으로 표현하면 풍속 1m/s 증가는 음의 방향으로 추정오차 2°C 증대에 해당한다. 기존 최저기온 추정모형에서 청명무풍 야간에 찬 공기의 유입과 축적에 의한 기온하강효과가 냉기호 중심에서 최대 4°C에 달하는데, 바람이 불면 기온 하강효과가 줄어들기 시작하여 풍속이 2m/s이면 거의 사라진다는 의미이다. 무덤이들에서는 분석에 이용된 25일 동안 이 시간대에 풍속이 최대 2m/s까지 관측되었으므로 이 오차를 제거하지 않는다면 기존 모형의 실용성이 반감될 것이 확실하다. 다행히 풍속에 따른 하강효과 감쇄 관계가 명확하고 직선적이라 얻어진 회귀식을 기존 모형의 보정에 사용할 수 있을 것으로 보인다. 직선의 Y축 절편값이 0.4°C인데 회귀계수에 의하면 이것은 풍속 0.2m/s에 해당하므로 만약 풍속이 0.2m/s 이하이면 기존 방법을 수정 없이 사용하고, 그 이상일 경우 기존 냉기집적효과(°C)에 풍속에 따른 감쇄분(°C)만큼 보정 해주면 된다.

### III. 경험식을 추가한 최저기온 추정방법의 신뢰성

풍속효과 경험식을 기존 일 최저기온 추정모형의 냉기집적효과( $E_2$ )에 다음과 같이 결합하였다.

$$E_2 = \left( \frac{R}{R_{\max}} \right) \cdot [\log_{10}(FA_5 + CAP_i) - 2.0U_2] \quad (5)$$

for  $U_2 > 0.2$  ( $m/s$ )

이 식에서  $U_2$ 는 지상 2m에서 관측된 60분 평균풍속이며 풍속효과에 의한 승온은 냉기집적효과를 벗어날 수 없다.

냉기호 수몰지대에 해당하는 지점 세 곳(station number 5, 6, 7 in Fig. 2)에 대해 선발된 25일간 매일 0501-0600LST의 평균기온을 바람효과 결합 모형에 의해 추정하고 그 결과를 기존 모형(Kim *et al.*, 2011)에 의한 추정결과와 비교하였다. 풍속자료는

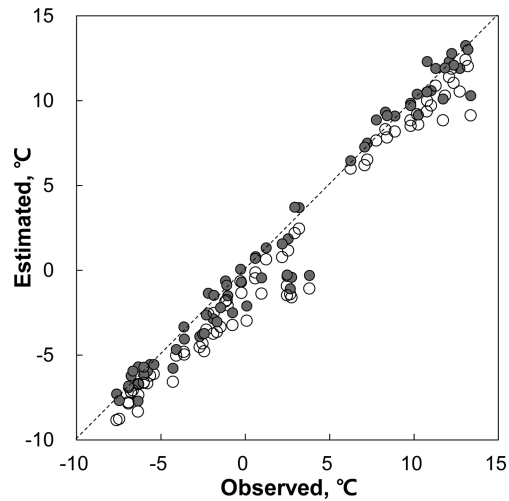


Fig. 4. Performance of the existing model (empty circle) and the wind-effect embedded model (solid circle) in predicting daily minimum temperatures at 3 locations within a cold air pool (station number 5, 6, 7 in Fig. 2).

WindStation 프로그램(Lopes, 2003)에 의해 모의된 바람벡터를 이용하였는데, WindStation은 Navier-Stokes 방정식과 k-e 모델, 지형의 거칠기에 따른 지표면 전단응력을 고려하여 대상지역의 바람벡터를 산출한다. 프로그램 입력자료로는 악양계곡에서 가장 가까운 방재기상관측망 화개 및 하동 AWS의 10m 풍속과 광주기상대 00UTC의 925hPa 바람자료를 사용하였고, 경계층 대기안정도는 WindStation 내 최대치 (0.004°C/m)로 설정하였다(Lopes, 2011). 악양계곡의 수치고도모형(DEM)과 지표피복도(LULC)를 30m 격자해상도로 준비하여 악양계곡을 중심으로 하는 24.6×24.6km의 구역에 대해 300m 격자 바람장을 모의하였다. 모의결과 중 지상 2m의 풍향풍속을 ASCII Grid파일로 변환하여 검증지점 세 곳에 해당하는 격자값을 추출하였다.

검증을 위한 실측기온은 세 지점에 설치된 자동온도기록계(HOBO Pro, Onset Corporation, USA)로부터 수집하였으며 측정간격은 5분이었고 0501-0600LST 평균값을 사용하였다. 세 지점에서 바람효과를 결합한 새 모형과 기존 모형에 의해 각각 추정된 기온값을 실측 기온과 비교한 것이 Fig. 4이다. 냉기호 형성이 의심되는 25일 동안 이 시간대에 세 지점에서 기록된 실측기온은 영상 13°C에서 영하 8°C로 범위가 넓었는데, 기존 방법에 의한 추정값이 대체로 1:1 라인보다

아래 쪽에 분포되는 반면, 새로운 방법에 의한 추정기온은 1:1 라인을 더 잘 따르는 것으로 보인다. 즉 기존 방법을 따르면 최저기온 추정치가 실제보다 더 낮은 경향을 보이지만 풍속효과를 적용함으로써 이런 경향이 크게 개선되었다. 육안에 의한 이러한 차이는 평균오차(mean error)를 계산해보면 기존 방법에서 -1.33인데 반해 새로운 방법으로는 -0.37로 크게 완화된 사실로부터 더욱 확실해진다. 추정오차의 평균평방근(RMSE)은 세 지점 평균 1.7에서 1.2로 30% 감소하였는데, 5번 지점의 경우 2.0에서 1.4로, 6번 지점은 1.5에서 1.2로, 7번 지점은 1.7에서 1.0으로 모두 오차 개선효과를 볼 수 있었다.

#### IV. 고 찰

풍속과 냉기호 형성 사이의 관계에 대해서는 이미 많은 연구가 진행되었는데, 냉기호 외부의 종관 풍속이 강해져서 5~7m/s에 이르면 냉기호는 형성되기 어렵고 사면 냉기 유입 및 집적에 의해 일단 생성되더라도 곧 소멸된다(Rakovec *et al.*, 2002; Zhong *et al.*, 2003; Dorninger *et al.*, 2011). 본 실험은 종관 풍속이 임계치 이내에서 형성된 냉기호가 유지되는 경우만을 대상으로 하였으며, 사면 활강류의 수렴과정에서 발생하는 상하공기의 혼합이 그렇지 않은 경우에 예상되는 지표 기온하강을 완화시킬 것이라 가설을 증명하고자 하였다.

악양계곡은 주변이 최고 1,100m에 이르는 높은 산으로 둘러싸여 있어 동, 서, 북쪽의 사면 활강류가 남쪽 집수역 출구에 집적되어 냉기호가 잘 형성되며, 제방에 의해 막힌 출구 쪽 분지(벼논)에는 서로 다른 방향에서 흘러 들어온 사면 활강류가 강하게 혼합되어 계곡 내 다른 지역보다 난류풍속이 증가한다. 이 같은 현상은 기존 방법(Kim *et al.*, 2011)에 의해 추정된 냉기호 구역 내 일 최저기온분포를 왜곡시킬 수 있다. 하지만 풍속증가에 따라 냉기호 효과를 정량적으로 보정해 줄 수 있는 간단한 방법이 본 실험을 통해 고안되고, 세 지점에서의 1년 간 검증과정에서 추정오차의 유의적인 감소를 확인할 수 있었다. 검증에 이용된 세 지점의 풍속이 바람장 모형에 의한 추정값이기 때문에 추후 보다 많은 지점에서 실측 풍속자료에 의해 보완이 이루어진다면 이 새로운 방법의 실용성을 다질 수 있을 것이다. 그럴 경우

기상청의 방재기상 관측자료뿐 아니라 ‘동네예보’(5km 격자단위 디지털예보)를 활용하여 내일과 모레의 최저기온 분포를 고해상도(예, 30m)로 생산할 수 있다. 이 정도 분해능을 갖춘 기온정보라면 개별 과원에 대해 맞춤형 동상해 경보를 발령하는 데도 활용할 수 있어 기상서비스를 영농현장 지원으로까지 확장할 수 있을 것이다.

#### 적 요

냉기호 지대 안에서도 일정 수준의 바람이 부는 장소에서는 일 최저기온이 기존 공간기후모형에 의해 예측된 만큼 떨어지지 않음이 관찰되었다. 경남 하동군 악양 집수역 출구부근의 실측자료를 토대로 냉기호가 형성된 25일에 대하여 기존 방법에 의한 일 최저기온 예측 시 발생하는 추정오차를 그 때 관측된 풍속과 비교한 결과 바람이 강해질수록 추정오차가 커지는 경향이 뚜렷해서 풍속이 2m/s에 이르면 냉기호 효과가 완전히 소멸되는 것으로 나타났다. 풍속과 추정오차간 관계는  $Y=2X+0.4$  ( $R^2=0.76$ )로 표현되며 이 식에서 Y는 추정오차(°C), X는 풍속(m/s)이다. 이 식을 기존 일 최저기온 추정모형의 냉기집적효과에 결합하여 악양 집수역 냉기호 수몰지역에 위치한 3곳의 일 최저기온 추정에 이용하였다. 이때 입력 풍속은 바람장 모형 구동에 의한 모의풍속이었다. 추정된 일 최저기온은 오차의 평균평방근(RMSE)이 기존 모형의 1.72에서 1.20으로 줄어들고, 평균오차(ME)로 표현한 편기성(bias)도 -1.33에서 -0.37로 개선되었다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청 ‘기상산업 지원 및 활용기술개발 사업’(과제번호 KMIPA 2011-1101)의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

#### REFERENCES

- Chung, U., H. H. Seo, K. H. Hwang, B. S. Hwang, J. Choi, J. T. Lee, and J. I. Yun, 2006: Minimum temperature mapping over complex terrain by estimating cold air accumulation potential. *Agricultural and Forest Meteorology* **137**, 15-24.
- Daly, C., D. R. Conklin, and M. H. Unsworth, 2009: Local

- atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts. *International Journal of Climatology* **30**, 1857-1864.
- Dorninger, M., C. D. Whiteman, B. Bica, S. Eisenbach, B. Pospichal, and R. Steinacker, 2011: Meteorological events affecting cold-air pools in a small basin. *American Meteorological Society* **50**, 2223-2234.
- Kim, S. O., and J. I. Yun, 2011: A quantification method for the cold pool effect on nocturnal temperature in a closed catchment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **13**(4), 176-184. (in Korean with English abstract) doi:10.5532/KJAFM.2011.13.4.176
- Lopes, A. M. G., 2003: Wind Station – a software for the simulation of atmospheric flows over complex topography. *Environmental Modelling and Software* **18**, 81-96.
- Lopes, A. M. G., 2011: WindStation version 2.0.7 User's Manual. 47pp.
- Rakovec, J., J. Merse, S. Jernej, and B. Paradiz, 2002: Turbulent dissipation of the cold-air pool in a basin: Comparison of observed and simulated development. *Meteorology and Atmospheric Physics* **79**, 195-213.
- Stigter, K., 2010: *Applied Agrometeorology*. Springer Inc., 1100pp.
- Yun, J. I., 2010: Agroclimatic maps augmented by a GIS technology. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **12**, 63-73. (In Korean with English abstract)
- Zhong, S., X. Bian, and C. D. Whiteman, 2003: Time scale for cold-air pool breakup by turbulent erosion. *Meteorologische Zeitschrift* **12**, 229-233.