POSTER 28

장기적인 저온 현상의 평년기후 대비 위험지수화 방법

김수옥[1**], 김도경[2], 최윤주[2]
[1]국가농림기상센터, [2]경희대학교 식물환경신소재공학과

Forecasting the Likelihood of Chronic Chilling Injury in Crops Based on Daily Temperature Data

S. O. Kim[1*], D. K. Kim[2], Y. J. Choi[2]
[1]*National Center for Agro-Meteorology, Seoul National University*
[2]*College of Life Sciences, Kyung Hee University*

I. 서 언

이상기후로 인한 작물 생산량의 감소는 농산물 가격과 수급의 불안정을 초래하기 때문에 기상으로 인한 재해 위험성을 사전에 감지하여 피해를 최소화할 수 있도록 조치하는 것이 관건이다. 현재 기상청에서는 최신 관측 및 예측기술에 의해 위험기상(weather hazards)을 미리 감지하여 시, 군, 구 공간단위의 기상특보를 발령하고 있지만 장기간에 걸친 누적효과에 의해 발생하는 '지발성 재해'(chronic damage)에 대한 고려는 없다. 그렇게 심한 정도는 아니지만 오랜 시간 누적된 저온, 일조부족, 혹은 강수부족 역시 작물의 생육과 품질에 영향을 미친다. 예를 들어 7, 8월 중 예년에 비해 비가 잦고 일조시간이 부족하면 여름작물에 기상청 특보만으로는 놓치기 쉬운 생리장애가 발생하며 수확량이 줄고 품질이 나빠진다. 이러한 지발성 재해를 적절한 시점에 예측하여 농가에 알려주는 일도 국가적으로 중요한 기상서비스이다.

이 연구에서는 위험기상과 여기에 노출된 작물 사이 상호작용으로부터 발생하는 피해 가능성(likelihood)을 '재해위험지수'로 정의하였다. 한 지역(특히 분수령으로 둘러싸인 집수역)에서 오랜 기간 재배되어 온 작물은 이 지역 특유의 환경조건(토양과 기후)에 맞춰 개체생장과 종족보존 측면에서 최적화를 이루었을 것이다. 이 작물을 다른 지역에 오랜 기간 재배한다면 그 환경에 적응하기 위해 외부 형태와 내부 기능(예, 초장, 잎의 크기-두께-형태, 줄기의 굵기, 과일의 당도 등)이 달라질 수 있다. 때문에, 오랜 기간 적응해온 기후범위를 벗어나는 날씨가 지속되면 거의 작물의 실패로 이어진다.

한 지역 특유의 기후조건은 최소 30년 이상 관측된 평년기후자료에 의해 평가할 수 있다. 평년의 기후는 평균과 분산(표준편차)으로 대표할 수 있으며 관측자료가 충분하다면 평균을 중심으로 좌우 대칭의 정규분포곡선이 된다. 어떤 기후요소의 관측값이 정규분포를 따른다면 대체로 3년에 2번 정도는 정상범위(평균으로부터 -1 ~ +1 표준편차)에 들 것이고 1번 정도는 이 범위를 벗어나며, 확률적으로 30년에 1번 정도는 평균으로부터 표준편차 2배 범위를 벗어나는 소

* Correspondence to : tolee7785@hanmail.net

위 '기상이변'(extreme weather)을 보일 수 있다. 한 지역의 평년기후 특성이 정규분포곡선으로 표현되면, 당해연도 기상조건을 곡선 상에 중첩시켜 기상이변 여부를 금세 알 수 있고, 그에 따라 작물재배에 위험한지 아닌지 확률적으로 판단하는 일이 어렵지 않다. 특히 평균 0, 표준편차 1인 표준정규분포를 이용하면 기상요소에 관계없이 위험정도를 단일 스케일의 재해위험지수로 나타낼 수 있다.

이 연구에서는 평년에 비해 저온이 오랜 기간 지속되어 나타나는 지발성 냉해(chronic chilling injury)를 과거 30년(1981-2010 평년)의 기후특성을 기반으로 한 확률변이로 표현하였다. 즉, 대상 기온조건의 30년 평균과 표준편차로 정규분포를 나타내고, 표준화된 정규분포확률변수 Z값으로 지수화하여 표준정규분포곡선 하의 상대적 위치를 재해 판정기준으로 삼는 방법이다.

II. 재료 및 방법

과거 30년의 기후특성을 평균과 표준편차를 이용한 정규분포로 나타낼 수 있다면 특정년도의 기상조건이 비정상(위험)인지 아닌지(안전) 표준화된 정규분포확률변수 (Z값)로부터 판정할 수 있다. 어떤 지역 i 에 대하여 임의시기의 지발성 냉해위험 확률(Z)은 평년기간 GDD 평균 μ_i 및 표준편차 σ_i 와, 임의시기의 GDD 계산값 X_i 에 의해 다음 식으로 계산된다.

$$Z_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (1)$$

표준정규분포에서 $-2 \leq Z$ 일 확률은 97.5%로 30년 가운데 29년에 해당한다. 만약 -2보다 낮은 Z 값이 계산되었다면 이는 30년에 1번 정도의 확률에 해당하는 냉해위험에 처하게 되었음을 위미한다. 이 경우는 경계단계로서 '냉해경보' (chill warning)를 발령할 수 있는 수준이다. 이보다 약하지만 Z 값이 -1보다 낮을 경우는 주의단계로서 '냉해주의보' (chill watch)를 발령할 수 있을 것이다.

장기간의 저온조건을 평가하기 위한 척도는 널리 쓰이는 적산온도(GDD, growing degree days)를 이용하였다. 작물의 생장에 기여하는 하루단위 열량(DHC, daily heat contribution)는 일 최고기온(Tmax), 일 최저기온(Tmin), 생육임계온도(Tb)에 따라 아래 식 (1)과 같이 계산된다(Kim and Yun, 2008).

$$DHC = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_b \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_{\min} < T_b,\ T_{\min} = T_b \\ T_{\max} > 30,\ T_{\max} = 30 \\ T_{\max} < T_b,\ GDD = 0 \end{cases}$$

식 (2)에서 작물생장의 비가역성을 반영하기 위해 일 최저기온이 생육임계온도보다 낮을 경우에는 일 최저기온이 생육임계온도로 대치된다. 또한 30℃ 이상의 고온에서는 호흡량 증가로 대개 생장량이 축적되지 않는 것을 감안하여 일 최고기온은 30℃로 제한한다. 생육임계온도는 냉해에 취약한 여름작물을 기준으로 10℃로 설정하였다. 원하는 기간 동안 매일의 최고, 최저기온자료에 의해 식 (2)을 구동시켜 DHC를 누적시키면 GDD가 된다.

$$GDD = \sum (DHC) \quad (3)$$

이 연구에서는 적산기간을 4주(28일)와 56일(8주)로 두고 GDD를 계산하였는데, 평년(1981-2010)의 평균적인 GDD 양상을 그 지역의 기후특성으로 두고, 특정년도의 해당 기간 (4주 혹은 8주) GDD를 계산하여 평년대비 위험지수로 표현하였다.

지역에 따른 지발성 냉해위험 비교를 위해, 기상청 기상관서 중 경기도 수원(중부 평야)과 강원도 대관령(중부 산간), 경북 추풍령(남부 산간), 경남 진주(남부 평야) 및 목포(남부 해안) 등 대조적인 기후특성을 갖는 5지점으로부터 1981-2010 기간 매일 최고기온 및 최저기온을 수집하였다(Fig. 1)

기온자료를 식 (1)과 (2)에 적용하여 직전 28일(4주) 및 56일(8주) 동안 생육임계온도 10℃ 조건에서 누적된 GDD를 매년 산출하고 이 GDD값의 30년 평균과 표준편차를 계산하였다. 또한 2010년 1월 1일부터 대관령, 수원, 추풍령, 목포, 진주기상대에서 수집된 매일 기온자료를 식 (1)에 대입하여 DHC를 계산하고, 식 (2)에 의해 4주 및 8주 간 누적시켜 적산온도를 추정하였다. 이것을 각 지역의 평년 정규분포에 적용하여 냉해위험지수(Z)로 변환하였다.

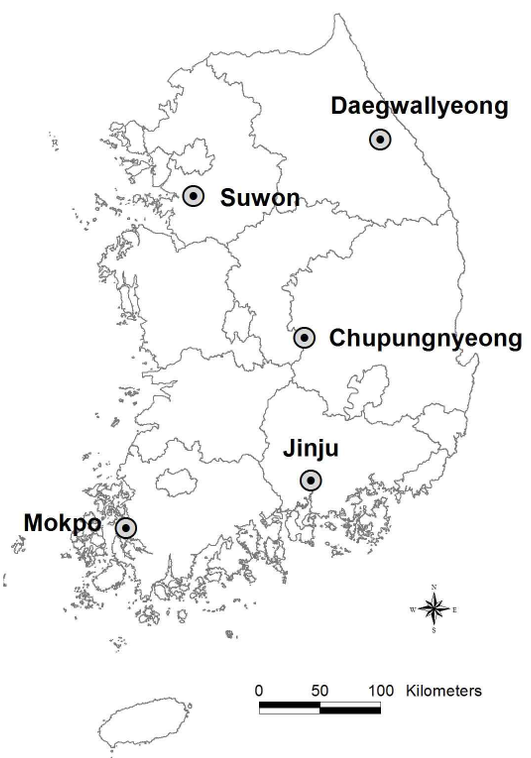

Fig. 1. 대관령, 수원, 추풍령, 목포, 진주 기상대의 위치

III. 결과 및 고찰

Fig. 2의 상단은 생육임계온도 10℃ 조건에서 기상관서 5곳에서 관찰된 4주 적산온도의 매일 변동을 평균에 대한 표준편차, 즉 변이계수(coefficient of variation, CV)에 의해 나타낸 것이다. 계절로는 이른 봄과 늦가을의 변동성이 크고, 지역으로는 중부 산간지대 (예, 대관령)에서 적산

온도의 변동성이 크다. 반면 작물생육기간인 6월부터 10월까지는 CV = 0.1 정도로 안정적이지만 대관령에서는 다른 지역에 비해 2배 이상의 변동성을 보인다. 남부지방으로 갈수록 변동성이 줄어들며 작물생육기간 중에는 대관령을 제외한 다른 지역들 간에는 차이가 거의 없다. Fig. 2의 하단은 상단과 동일하나 적산기간만 8주로 늘린 결과이다. 전반적인 추세는 4주적산과 비슷하지만 변이계수의 크기가 더 줄어들었으며 추세선이 훨씬 완만해졌다. 역시 대관령에서 연중 가장 큰 변이를 보이며, 계절적으로는 봄에 비해 늦가을의 변동성이 더 커지는 경향이 모든 지점에서 나타났다. 지역 간 적산온도 변동성은 한여름(6, 7, 8월) 보다 계절이 바뀌는 봄, 가을에 더 차이가 벌어진다. 이 시기에는 같은 정도의 기온변동이라도 지역 간에 서로 다른 위험으로 작용할 가능성이 높다.

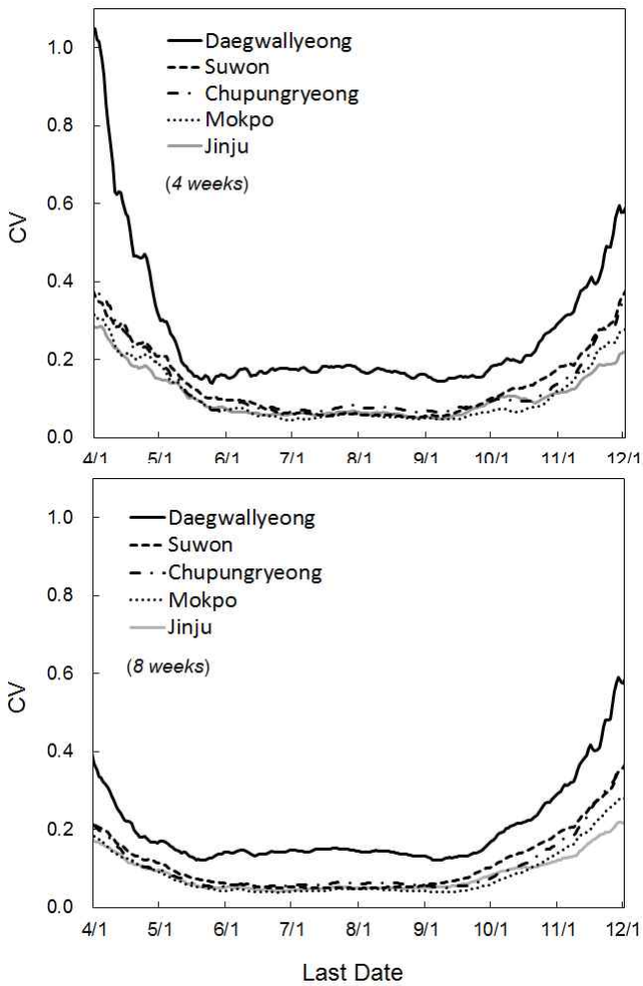

Fig. 2. 평년기후 조건에서 대관령, 수원, 추풍령, 목포, 진주 기상대의 4주간(위) 및 8주간(아래) 적산온도(GDD, 기준온도 10도)의 변이계수 (Coefficient of Variation, CV) 추이

Fig. 3은 2010년도의 적산온도 누적의 마지막 날짜(last date)를 기준으로 직전 4주 혹은 8주간 냉해위험지수를 보여준다. 4주 적산온도 기반의 위험지수는 3월 하순부터 급격히 하강하여 대관령을 제외한 모든 지점에서 3월 21-23일 사이에 지발성냉해 주의단계(오렌지 Z0 = -1)에 도달하였다. 그리고 4월 중순에는 대관령과 추풍령을 제외한 3지점에서 경계단계(레드 Z0 = -2)에 도달하여 중간에 약간 회복되었다가 다시 5월초까지 이 상태가 지속되었다. 한편 8주 적산온도 기반의 위험지수는 3월 초부터 지속적으로 하강하여 3월말부터 4월초에 걸쳐 진주-추풍령-목포-수원 순으로 냉해위험 주의단계(오렌지 Z0 = -1)에 도달하였다. 그리고 4월 하순에는 진주-목포-추풍령-수원 순으로 경계단계(레드 Z0 = -2)에 도달했다가 5월 초에 수원-추풍령-진주 순으로 회복되었다. 목포의 경우 경계단계 위험이 6월 중순까지 지속되었다.

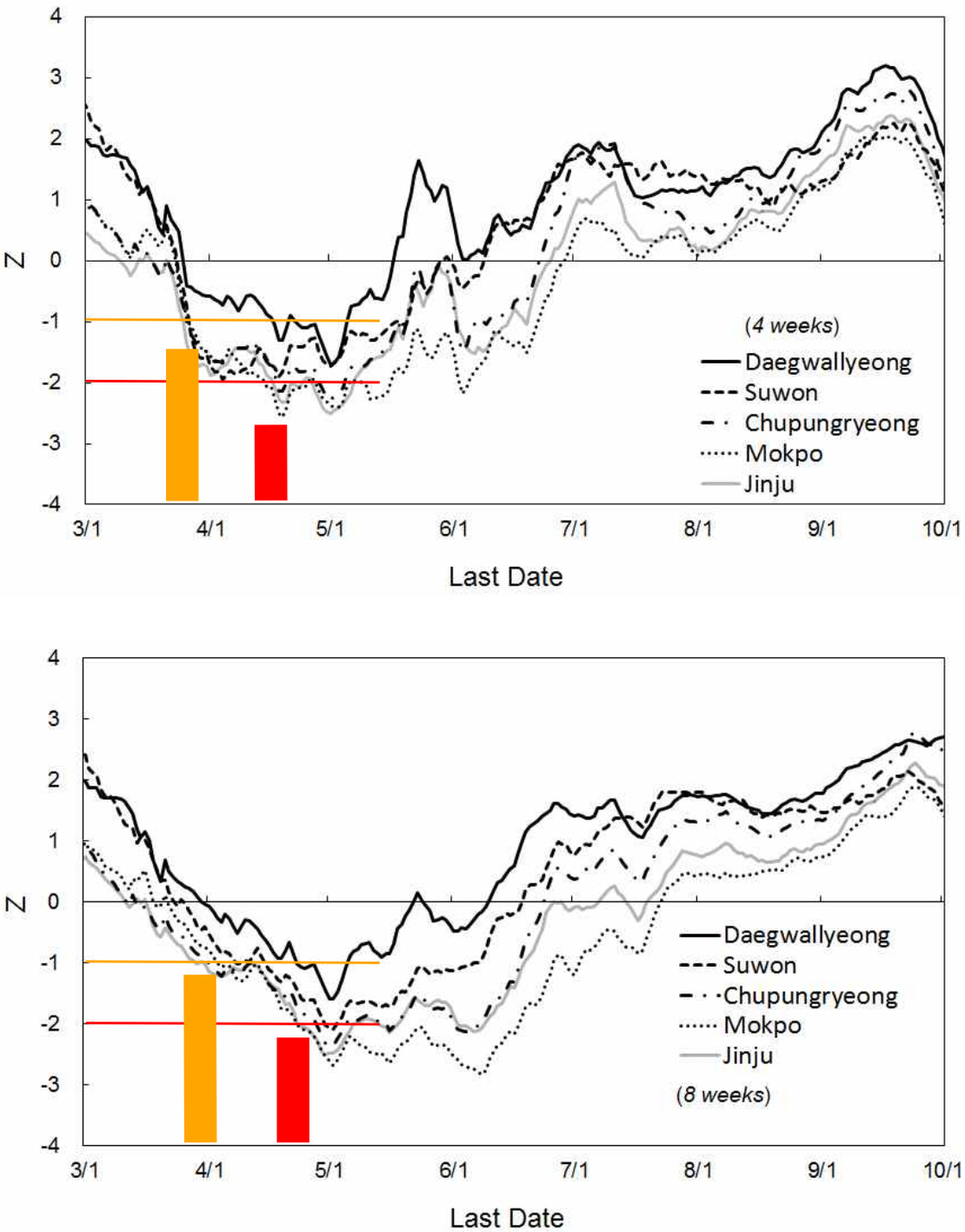

Fig. 3. 대관령, 수원, 추풍령, 목포, 진주의 2010년 적산온도 기준 냉해위험지수의 변화. 해당 날짜(last date) 직전 4주간(위)과 8주간(아래) 적산값을 정규분포의 평균 및 표준편차와 비교한 값(Z). 지발성 냉해 주의단계(오렌지 Z0 = -1) 및 경계단계(레드 Z0 = -2) 도달시기를 막대로 표시하였음

2010년은 잦은 기상이변과 그에 따른 재해로 인해 사회적 경각심이 최고조에 달한 해였으며,

이상기후에 관한 정부 기관 합동 보고서에 의하면(관계부처 합동, 2010) 이 해 봄에 배, 복숭아, 매실 등 과수에서 수정불량, 낙과피해가 발생하였으며, 맥류는 생육이 지연되고 병발생이 증가하여 수량이 줄었다. 무, 배추 등 노지채소는 생육부진과 추대발생으로 수량과 상품성이 저하했으며, 제주, 전남지역 조생양파도 저온피해를 입었다. 전국의 피해면적을 집계해보면 총 38,763ha로서 이 가운데 20,000ha는 필지의 절반 이상이 피해를 입는 심각한 수준이었다. 이 같은 피해소식은 4월 7일자 신문에 보도된 것을 시작으로 5월 4일까지 이어지며 이 같은 장기간 저온피해는 지발성 재해의 대표적인 사례로 판단된다 (한국일보, 2010년 4월 7일 A11면 사회; 노컷뉴스 2010년 5월 4일 A12면 종합). 4주 적산온도 기반의 위험지수는 실제 냉해 발생이 언론에 보도된 4월 6일 보다 10~15일 전에 이미 주의단계에 도달하여 조기경보(early warning) 목적으로 충분히 실용화가 가능한 점이 장점이라 할 수 있다. 심각한 피해가 발생할 것을 예견하는 경계단계 도달날짜 역시 4월 중순으로서 8주 적산온도 기반의 위험지수에 비해 선행기간이 길다. 하지만 8주 적산온도 기반의 위험지수의 경우 4주에 비해 날짜에 따른 변동이 심하지 않아서 추세를 전망하는 데 유리하며, 더욱이 위험단계 도달날짜가 지역 간에 뚜렷이 구분되는 점이 장점이라 할 것이다. 종합적으로 4주적산은 경보발령시기 책정에 유리하고, 8주적산은 장기적인 추세 및 지역 간 맞춤경보 발령에 유리하므로 두 지수를 적절히 사용한다면 지역별 지발성 냉해위험의 조기탐지에 기여할 것으로 보인다. 특히 본 연구에서 제시한 방법은 같은 정도의 저온축적이라도 지역에 따라 정상범위인지 이상기상인지 판정기준이 30년간 표준편차로 표현되므로 지역특성이 반영되어 지역 간 냉해위험의 차별화가 가능하다.

감사의 글

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

인용문헌

Kim, J. H., and J. I. Yun, 2008: On mapping growing degree-days (GDD) from monthly digital climatic surfaces for South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(1), 1-8.

관계부처 합동, 2010: 2010 이상기후 특별보고서, 녹색성장위원회-기상청 주관, 14개 기관 참여, 발간등록번호 11-1360000-000705-01. 114pp.