

## 기상재해 가능성의 위험지수화

김대준\*

경희대학교 식물환경신소재공학과

### Categorizing Likelihood of Agrometeorological Hazards into Risk Indices

Dae-jun Kim\*

Agricultural Climatology Lab, College of Life Sciences, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

#### I. 개요

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 가능성이 높다. 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. 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 정상 범위(평균으로부터  $-1 \sim +1$  표준편차)에 들 것이고 이를 벗어나면, 소위 ‘기상이변’(extreme weather)이라 할 수 있다(Fig. 1).

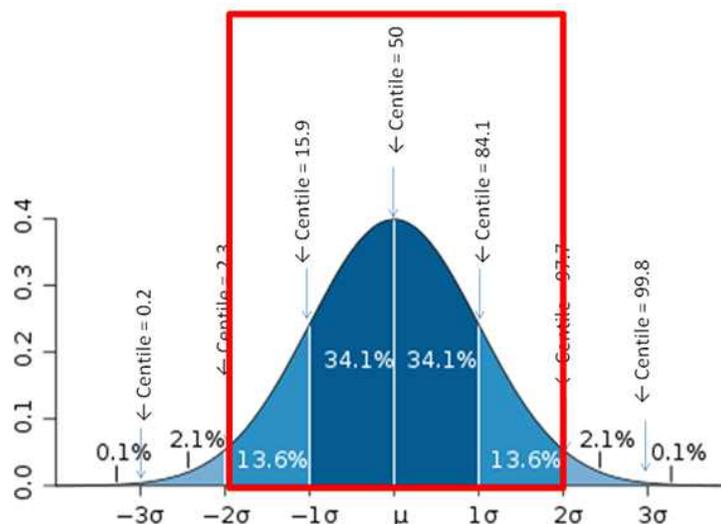


Fig. 1. 정규분포곡선. 표준편차 구간에 따른 곡선 하부의 면적비율(발생확률).

\* Correspondence to: djcoming@naver.com

일 년 이내(초본성 채소나 식량작물)에서 십 수 년(목본성 과수)에 이르는 작물의 재배수명을 고려하면, 30년 평년의 정규분포곡선(평균과 표준편차)만으로 한 지역의 재배적지 판정용 기후 조건을 도출하는 일에 큰 무리가 없다. 한 지역의 평년기후 특성이 정규분포곡선으로 표현되면, 당해연도 기상조건을 이 정규분포 상에 중첩시켜, 해당 기상조건이 작물재배에 위험한지 아닌지 확률적으로 판단할 수 있게 된다. 특히 평균 0, 표준편차 1인 표준정규분포를 이용하면 기상 요소에 관계없이 위험정도를 단일 스케일의 재해 위험지수(risk index)로 나타낼 수 있다. 가뭄, 일조 부족 등 모든 작물에 공통적으로 적용할 수 있는 ‘작목공통위험지수’(general risk index)는 지역별 정규분포로부터 즉시 찾아낼 수 있을 것이다. 작목과 품종, 생육단계에 따라 정해지는 기상재해의 종류와 위험에 해당하는 기후임계값을 알고 있다면 이것을 기준으로 ‘작목맞춤위험지수’(specific risk index)를 만들 수도 있다. 이 발표에서는 위험기상과 작물과의 상호작용으로부터 발생하는 피해 가능성(likelihood)을 지수화 하는 ‘재해위험지수’를 다룬다.

## II. 작목공통위험지수

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. 오랜 시간 누적된 저온, 일조부족, 혹은 강수 부족은 작물의 생육과 품질에 영향을 미칠 수 있다. 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.

### 2.1. 지발성 냉해

평년에 비해 저온이 오랜기간 지속되어 나타나는 냉해를 지발성 냉해(chronic chilling injury)라고 표현한다. 장기간의 저온조건을 평가하기 위한 척도는 널리 쓰이는 적산온도(GDD, growing degree days)를 이용한다. 작물의 생장에 기여하는 하루단위 열량(DHC, daily heat contribution)은 일 최고기온( $T_{max}$ ), 일 최저기온( $T_{min}$ ), 생육임계온도( $T_b$ )에 따라 아래 식 (1)과 같이 계산된다(Kim and Yun, 2008).

$$DHC = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_b \quad \begin{cases} T_{min} < T_b, T_{min} = T_b \\ T_{max} > 30, T_{max} = 30 \\ T_{max} < T_b, GDD = 0 \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 작물생장의 비가역성을 반영하기 위해 일 최저기온이 생육임계온도보다 낮을 경우에는 일 최저기온이 생육임계온도로 대체된다. 또한 30°C 이상의 고온에서는 호흡량 증가로 대개 성장량이 축적되지 않는 것을 감안하여 일 최고기온은 30°C로 제한한다. 생육임계온도는 냉해에 취약한 여름작물을 기준으로 10°C로 설정하였다. 원하는 기간 동안 매일의 최고, 최저기온 자료에 의해 식 (1)을 구동시켜 DHC를 누적시키면 GDD가 된다.

$$GDD = \sum(DHC) \quad (2)$$

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

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

$$Z_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (3)$$

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

2010년은 잦은 기상이변과 그에 따른 재해로 인해 사회적 경각심이 최고조에 달한 해였으며, 이를 반영하여 유사 이래 처음으로 이상기후에 관한 정부 기관 합동 보고서가 발간되기도 하였다 (관계부처 합동, 2010). 보고서에 수록된 내용 가운데 이상저온에 의한 영향(32쪽)에 따르면 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). 따라서 이 연구에서 제시하는 지발성 냉해위험 예측방법을 2010년 기상조건에 적용했을 때 과연 저온피해를 사전에 대비할 수 있을 만큼 기간을 두고 탐지해낼 수 있는지 검증해 볼 수 있다.

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. 다음 그림은 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  $Z_0 = -1$ )에 도달하였다. 그리고 4월 중순에는 대관령과 추풍령을 제외한 3지점에서 경계단계(레드  $Z_0 = -2$ )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  $Z_0 = -1$ )에 도달하였다. 그리고 4월 하순에는 진주-목포-추풍령-수원 순으로 경계단계(레드  $Z_0 = -2$ )에 도달했다가 5월 초에 수원-추풍령-진주 순으로 회복되었다. 목포의 경우 경계단계 위험이 6월 중순까지 지속되었다.

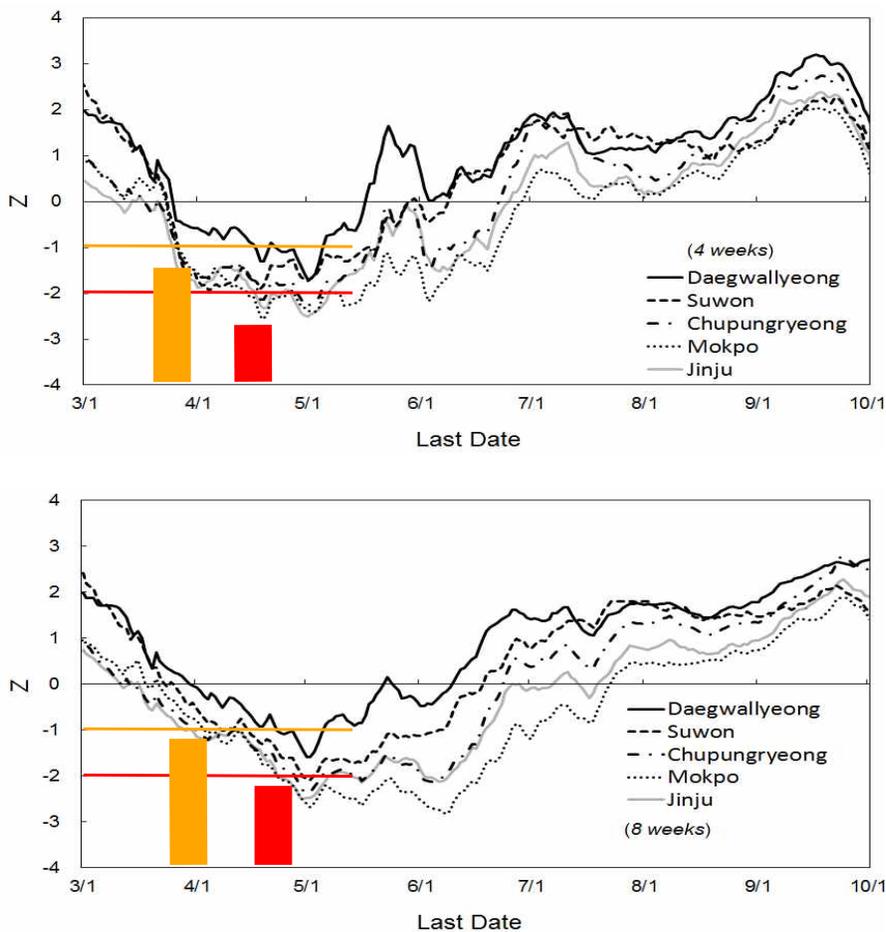


Fig. 2. 대관령, 수원, 추풍령, 목포, 진주의 2010년 적산온도 기준 냉해위험지수의 변화. 해당 날짜(last date) 직전 4주간(위)과 8주간(아래) 적산값을 정규분포의 평균 및 표준편차와 비교한 값( $Z$ ). 지발성 냉해 주의단계(오렌지  $Z_0 = -1$ ) 및 경계단계(레드  $Z_0 = -2$ ) 도달시기를 막대로 표시하였음

이런 결과로부터 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 전망하는데 유리하며, 더욱이 위험단계 도달날짜가 지역 간에 뚜렷이 구분되는 점이 장점이라 할 것이다.

종합적으로 4주적산온도 경보발령시기 책정에 유리하고, 8주적산온도는 장기적인 추세 및 지역 간 맞춤형 경보 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.

## 2.2. 일조부족

장기간 일조량이 부족할 경우 작물의 생육이 영향을 받게 되는데, 평년에 비해 일조량이 오랜 기간 부족하여 나타나는 지발성 일조부족 현상을 과거 30년(1981-2010 평년)의 기후특성을 기반으로 한 확률변이로 표현할 수 있다.

대상지역 일조시간의 분포특성을 30년 평균과 표준편차로 이루어진 정규분포로 나타내고, 표준화된 정규분포확률변수  $Z$ 값으로 지수화하여 표준정규분포곡선 하의 상대적 위치를 재해 판정기준으로 삼게 되는데, 특정년도의 일조량이 평년에 비하여 표준편차의 2배( $-2\sigma$ ) 이하로 나타날 경우, 지발성 냉해와 마찬가지로, 30년에 약 1번 정도에 해당하는 일조부족 상황에 처하게 됨을 의미한다. 임의 시기의 4주 또는 8주간의 적산 일조시간을  $X_i$ 로 나타낼 때, 해당 시기의 일조량 조건이 비정상(위험)인지 아닌지(안전) 표준화된 정규분포확률변수( $Z$ 값)를 계산하는 식은 지발성 냉해의 계산식인 식(3)과 같다.

여기서  $\mu_i$  는 해당 시기에 대하여 30년 동안 평균적인 적산 일조시간을,  $\sigma_i$  는 30년간의 표준편차를 의미한다. 만일  $Z$ 값이  $-2$ 보다 낮을 경우, ‘일조부족 경보’ (low sunshine warning)를,  $Z$ 값이  $-1$ 보다 낮을 경우는 주의단계로서 ‘일조부족 주의보’ (low sunshine watch)를 발령한다.

## 2.3. 농업가뭄지수

토양 중에는 과거에 공급된 수분이 일정기간 동안은 저장되며, 식물은 이 저장된 수분을 이용할 수 있다고 가정한다. Byun and Wilhite(1999)은 일단위로 가뭄여부를 판단할 수 있는 EDI를 개발할 때 유효강수량(Effective Precipitation)이라는 개념을 이용하였는데, 매일 강수량에 가중치를 적용한 과거의 일 강수량을 더하는 방식이다. 유효강수량 산정을 위해서는 우선 일 강수량 자료가 필요하다. 본 연구에서는 해당 일의 60일 전부터의 강수량에 각각의 날에 해당되는 가중치를 적용하고(Table 1), 이들을 적산하여 해당 일의 유효강수량을 얻은 다음, 해당 주 7일 동

안의 일 단위 유효강수량을 평균하여 해당 주의 유효강수량으로 두었다. 이 유효강수량에서 증발산량과 지면유출량을 빼주면 이론상 토양 잔류수분량을 얻을 수 있다.

Table 1. Daily weighting factor for calculating the effective rainfall

Days before	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Weighting Factor</b>	<b>4.1</b>	<b>3.4</b>	<b>3.0</b>	<b>2.7</b>	<b>2.5</b>	<b>2.3</b>	<b>2.1</b>	<b>2.0</b>	<b>1.9</b>	<b>1.8</b>
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	<b>1.7</b>	<b>1.6</b>	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>	<b>1.4</b>	<b>1.3</b>	<b>1.3</b>	<b>1.2</b>	<b>1.2</b>	<b>1.1</b>
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	<b>1.1</b>	<b>1.0</b>	<b>1.0</b>	<b>0.9</b>	<b>0.9</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	<b>0.7</b>	<b>0.6</b>	<b>0.6</b>	<b>0.6</b>	<b>0.6</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>

증발산량은 기상자료를 이용하여 기준증발산량을 계산한 다음, 작물계수를 적용하여 실제증발산량을 추정한다. 기준증발산량( $ET_0$ , mm day<sup>-1</sup>)은 다음 식으로 계산된다(Allen *et al.*, 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (4)$$

여기서  $R_n$  은 순복사량(MJm<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>),  $G$ 는 지중열류(MJm<sup>-2</sup>day<sup>-1</sup>)로 하루 적산값은 '0'이라는 Hur *et al.*(2006)의 값을 적용하였으며,  $\gamma$ 은 건습계상수(kPa°C<sup>-1</sup>),  $T$ 는 2m 높이의 일 평균기온(°C),  $U_2$ 는 2m 높이의 평균 풍속(ms<sup>-1</sup>),  $e_s$ 는 포화수증기압(kPa),  $e_a$ 는 실제 수증기압(kPa),  $\Delta$ 는 포화수증기압의 온도에 따른 기울기이다. 각 요소별 구체적인 계산방법은 Allen *et al.*(1998)을 따른다.

식 (4)에 의해 기준증발산량을 매일 계산하여 일주일 치를 합산하고 여기에 재배작물 및 발육 단계에 따른 작물계수( $K_c$ )를 적용하여 해당작물의 실제증발산량을 얻을 수 있다(식 5).

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (5)$$

작물계수는 논벼 외의 작물은 Allen *et al.* (1998)이 제시한 작물분류표에서 연구대상지역의 작목과 유사한 식생을 찾아 지목 별 대표 작물계수로 설정하였다. 적용기간은 파종 후 발아까지

의 초기단계, 발아 후 개화까지의 중간단계, 개화 이후 수확까지의 후기단계로 구분하였다. 논  
의 경우 30년간 논벼의 작물소비수량 실측자료를 근거로 파종 후 120일까지 10일 단위로 산정  
한 Yoo *et al.*(2006)의 작물계수 값을 사용하였다.

강수량이 지표면에 도달하면 일부는 증발하고, 일부는 토양으로 흡수된다. 미처 흡수되지 못  
한 초과수분은 지표면을 흘러 유출되는데, 본 연구에서는 유출량 추정을 위해 미국 토양 보존  
국(SCS, U. S. Soil Conservation Service) 에서 개발한 유출곡선지수(Runoff Curve Number)를 사용  
하였다. CN값은 강우-유출관계를 해석하여 토지 이용도, 토양의 성질에 따라 지표수 유출의 잠  
재력을 표시한다(Morel-Seytoux and Verdin, 1982; Shin and Kim, 2000). CN값은 1에서 100까지의  
범위를 가지고 있으며, 토양의 최대 함수량(S)에 반비례한다. SCS에서 제시하고 있는 CN 값은  
수문학적 토양군(hydrologic soil group)과 토지이용에 따라 분류되는데 (McCuen, 1982; Ha *et al.*,  
2009), 유출량(Q)은 CN값을 이용하여 다음 식에 의해 계산된다.

$$Q = \frac{(P)^2}{P + S} \quad (6)$$

여기서  $P$ 는 유효강수량,  $S$ 는 토양의 최대함수량으로 다음 식에 의해 산정한다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \text{ (mm)} \quad (7)$$

예를 들어 표준편차 1배 이내 범위에 속한다면 정상적인 토양수분상태이지만, 2배를 벗어나  
면 30년에 한 번 정도의 이변으로 간주하며, 3배를 넘게 되면 100년에 1회 정도의 희귀한 가뭄  
으로 본다. 이를 기준으로 농업가뭄지수(Agricultural Drought Index, ADI)를 4단계로 분류하였다  
(Table 2).

Table 2. 농업가뭄지수에 의한 가뭄정도 구분

Index	Drought Stage (DS)	Description
< -3	DS3	Extreme drought
-3 - -2	DS2	Severe drought
-2 - -1	DS1	Mild drought
-1 - 0	DS0	Normal

토양 중 물의 공급과 수요 간 물수지는 유효강수량에서 증발산량과 지면유출량을 뺀 잔류수  
분량(EW)이 되며 다음 식으로 표현된다.

$$EW = EP_w - ET_c - Q \quad (8)$$

여기서  $EP_w$ 는 유효강수량,  $ET_c$ 는 작물증발산,  $Q$ 는 지면유출량이다. 잔류수분량의 주 단위 분포는 왼쪽으로 치우쳐진 Gamma 분포와 비슷한데, 이를 종 모양의 정규분포로 변환하기 위해서는 자연대수를 취하면 된다 (Hillel, 1998). 잔류수분량의 자연대수값을 ‘잔류수분지수’라 칭하고 기후학적 평년의 평균(avg)과 표준편차(sd)를 계산하였다.

$$EW_L = \log_e(EW)_w \quad (9)$$

기후학적 평년의 52개 주에 대해 각각 잔류수분지수를 계산하여 표준편차로 나누면 평균이 0, 표준편차가 1인 표준정규분포에 근접한다. 임의연도 임의 주차의 잔류수분지수를 계산하여 평년 평균과의 편차를 얻고 이를 표준화시키면 평년 정규분포 상에서 상대적인 위치( $Z$ , 발생확률)를 알 수 있다. 이것은 기후학적 평년 대비 해당 주의 토양수분 과부족을 판단하는 지표로 쓸 수 있다.

$$Z = \frac{(EW_L - avg)}{sd} \quad (10)$$

경남 하동군 악양면 내 해발고도 250m 남동사면에 위치한 ‘햇차원’(토성 사양토)을 대상으로 실험기간 동안의 가뭄지수를 계산하여 기상청의 가뭄지수(SPI)와 비교한 것이 Fig. 3이다. 두 가뭄지수 모두 시간경과에 따른 가뭄의 추이를 표현하는 양상은 유사하였지만 가뭄의 심각성을 나타내는 데는 상당한 차이를 보였다. 농업가뭄지수(ADI)의 경우 2012년 23~29주차, 2013년 32~40주차에 ‘심한 가뭄’을 나타내었지만, SPI의 경우 실험기간 동안 ‘심한 가뭄’으로 표현된 주차는 한 차례도 없었다. 이 시기에 실제로 악양지역 여러 농가에서 가뭄으로 인한 어려움이 보고되었고(‘햇차원’, ‘배달농원’, 상명농장’을 포함한 다수의 현지농가 면담), 2012년 제주도는 5, 6월 강수량이 32년만에 가장 적었고, 2013년에는 90년만의 가뭄으로 인해 노지감귤, 콩, 수박 등의 작물피해로 약 2,000억원의 피해액이 보고된 바 있다. 경기지역에서 2013년에 평년의 10% 미만의 강수량만이 관측되는 등 실험기간 내 전국적으로 기록적인 가뭄이 보고되었다(기상청, 2013). 이러한 간접적인 증거만으로도 SPI에 비해 ADI가 2012년과 2013년의 가뭄 정도를 더 잘 반영하였다고 판단된다.

악양면 전체를 대상으로 상세한 기상 및 공간자료를 이용하여 가뭄이 극심했던 2013년 9월 마지막 주차(39주차)부터 해결되었던 10월 셋째 주(42주차)까지 ADI의 공간분포를 제작하였다. 분포도를 보면 39주차에는 산림지대 일부를 제외하고 ‘매우 심한 가뭄’을 뜻하는 붉은 색이 대부분이지만, 9월 29일부터 5일간 지속된 강수에 의해 10월 첫째 주(40주차)에 ‘매우 심한 가뭄’(붉은색)이 한 단계 아래인 ‘심한 가뭄’(오렌지색)으로 완화된 것을 확인 할 수 있다. 또한 10월 9~10일에도 강수가 관측되었는데, 10월 셋째 주(42주차)에는 ‘매우 심한 가뭄’이나, ‘심한 가

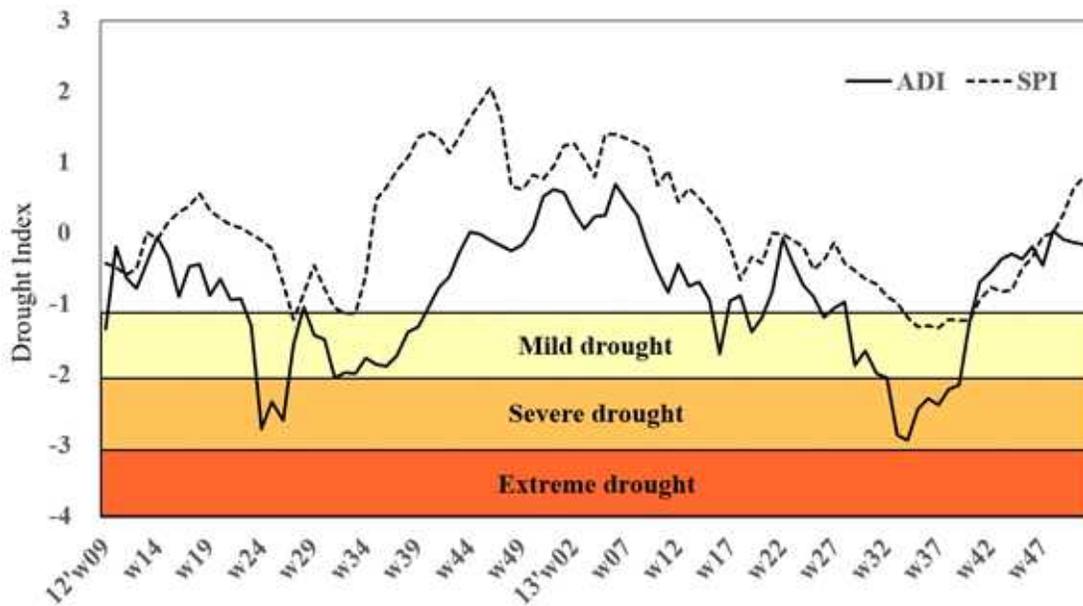


Fig 3. 하동군 약양면 ‘햇차원’에서 2012 ~ 2013 기간 중 추정된 매주 가뭄지수. 비교를 위해 기상청의 표준강수지수 계산값을 함께 제시함.

뭉’ 지역은 대부분 사라졌고 ‘약한 가뭄’ 정도로 완화되었음을 확인 할 수 있다.

전반적인 가뭄분포양상은 작물이 재배되고 있는 논밭에 비해 산림지역의 가뭄이 덜한 것으로 표현되며, 같은 산림지역이라도 하천을 중심으로 동향사면이 많은 서쪽 산록에 비해 서향사면이 많은 동쪽 산록에서 가뭄이 심하다. 이는 서향사면의 경우 동향사면에 비해 낮시간대 기온이 높기 때문에 증발산량이 많았기 때문으로 추정된다.

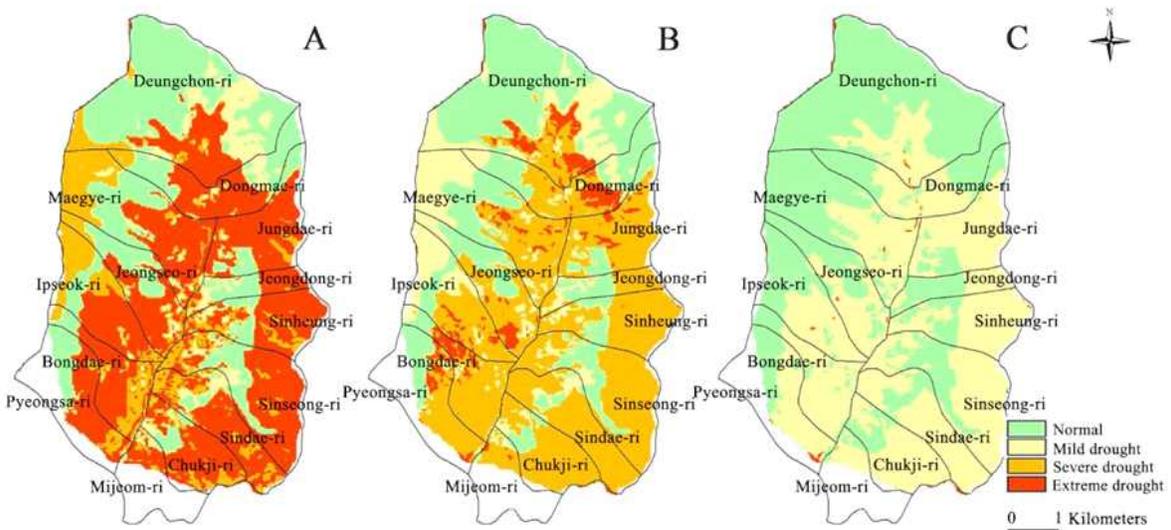


Fig. 4. 하동군 약양면을 대상으로 추정된 2013년 주별 가뭄지수 분포(A: 39주차, B: 40주차, C: 42주차).



여 생물계절모형, 발육속도모형, 성장도일모형 등 적합한 추정모형을 적용하여 온도날짜에 근거한 주요 생육단계를 추정할 수 있는데, 이를 본 과제에서는 ‘영농달력’이라고 부른다.

생물계절 추정연구가 다수 이루어진 벼, 보리 등 식량 작물과 복숭아 등의 과수 등은 기존 문헌자료 내 기준을 참고하였다. 생물계절 연구사례가 미흡한 작물의 경우, 유관기관 등에서 수행한 재배시험자료로부터 파종, 발아, 개화 등 발육단계 별 관찰일자를 수집하고 해당 시험장이 위치한 지역의 기상대 관측값을 수집하여, 적산온도를 역추적 하였다(Table 3).

또한 집수역 단위로 영농달력을 제작하기 위하여, 1981-2010년 평년기후(한국기후도의 시군 지점별 기상자료)를 토대로 집수역 단위 면적가중평균에 의해 재분석된 810개 집수역 단위 기후자료를 복원하였다. 주요 작물의 휴면해제, 발아, 개화, 생리적 성숙 등 주요 발육단계 도달일자를 집수역 단위 기후자료에 의해 온도시간(평균, 표준편차, 사분위수 등)으로 표현하고 이를 해당 작물의 기후학적 평년의 영농달력으로 간주하였다(Fig. 3).

Table 3. 수집 및 추정을 통해 조사한 작목별 생물계절 정보(벼 중만생종 예시)

벼(중만생종) 생육기(달력)	묘대기 4월중-5월초	이앙 및 착근기 5월중-6월초	분얼기 6월중-7월중	신장기 7월중-8월중	출수개화기 8월하-9월하	결실기 10월초-10월중
Tbase=0℃	540	1000	2050	2570	3350	4400
Tbase=5℃	270	590	1400	1800	2440	3220
Tbase=10℃	110	300	860	1160	1640	2180

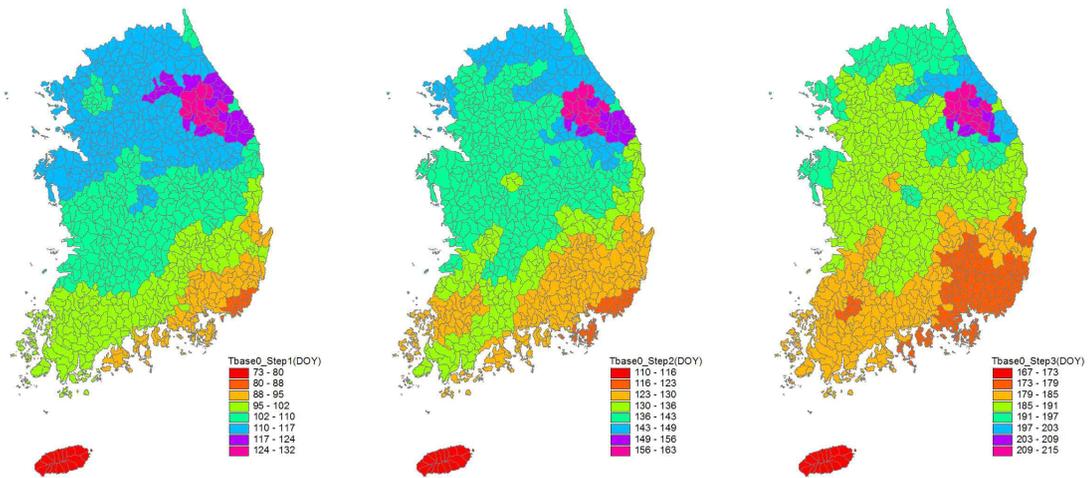


Fig. 6. 벼(중만생종)의 Tbase 0℃를 기준으로 제작한 영농달력(묘대기, 이앙기, 분얼기 해당 날짜)

### 3.3. 평년기준기상위험분포

작목별 영농달력을 토대로 재해위험기준(reference risk)을 집수역 단위로 설정하였다. 재해위험

이 큰 기상요소에 대하여 기본통계량(영농달력 상 특정기간 최고, 최저, 평균, 적산, 편차 등)과 위험기상의 출현횟수 및 지속기간(adverse days)에 대해 각 분포를 정규화(normalization) 하였다. 영농달력 상 해당 기간의 기상요소를 그 성격에 맞게 평균 또는 적산하고 그 평균값(x)를 표준편차( $\sigma$ )로 나누게 되면 평년기후조건에서 위험한 정도를 파악할 수 있게 된다. 이들 정규분포에 근거하여 세계기상기구 기후전문위원회에서 제시한 기후극한지수를 집수역 별로 추정하였다.

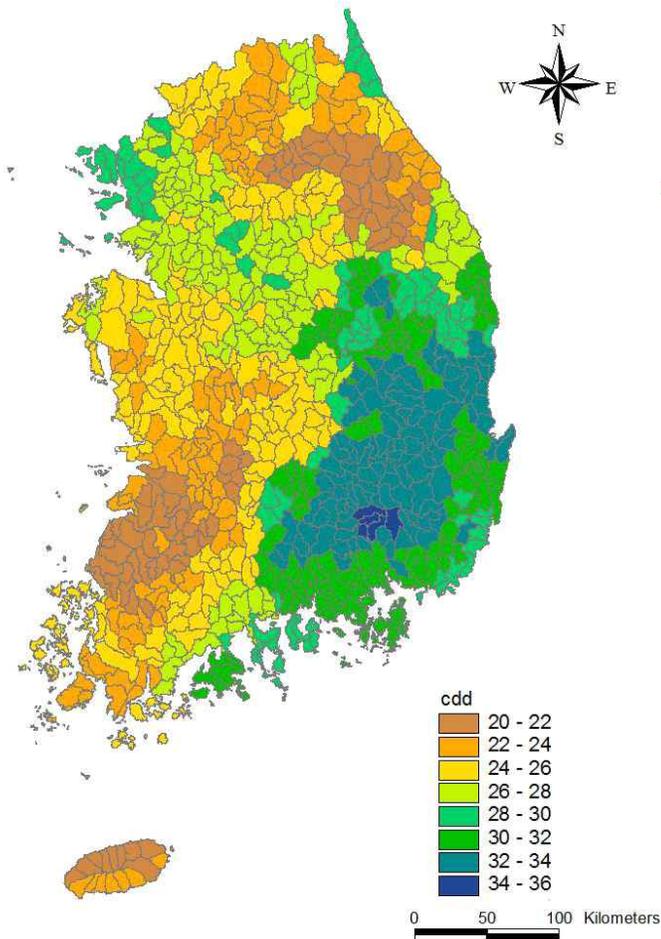


Fig. 7. 강수관련 평년 극한지수 분포도 중 최대무강수지속기간(CDD)

### 3.4. 당해연도 실제기상위험 판정

향후 기상실황 상세화를 통해 생산된 기상자료로부터 계산된 재해위험이 해당 집수역의 정상 기후조건에서 기대되는 위험수준으로부터 얼마나 벗어나는지를 작목별로 표현할 것이다. 예를 들어 평년 기준위험의 확률분포함수(z)를 특정 작목에서 재해위험을 유발하는 임계온도로 대치하고, 당해연도 예측온도를 확률분포 위에 중첩시켜 위치정보와 연계하면 농장, 과원 등 개별 경지단위로 재해위험을 판정할 수 있다.

## 인용문헌

- Allen, R. G., L. S. Peretira, D. Raes, and M. Smith, 1998: *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO irrigation and drainage paper **56**, UN-FAO, Rome, Italy.
- Byun, H. R., and D. A. Wilhite, 1999: Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate* **12**, 2747-2756
- Ha, K. C., W. B. Park, and D. C. Moon, 2009: Estimation of direct runoff variation according to land use changes in Jeju island. *Economic and Environmental Geology* **42**(4), 343-356. (in Korean with English abstract)
- Hillel, D., 1998: *Environmental Soil Physics*. Academic Pr. 660pp.
- 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.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist 1993: *The relationship of drought frequency and duration to time scale*. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, January 17-22, pp. 179-184.
- Morel-Seytoux, H. J., and J. P. Verdin, 1982: Correspondence between the SCS CN and Infiltration Parameters. *Advance in Irrigation and Drainage*, 308-319.
- Shin, K. J., and Y. J. Kim, 2000: Application of GIS technique for direct runoff estimation. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography* **18**(2), 199-209. (in Korean with English abstract)
- Yoo, S. H., J. Y. Choi, and M. W. Jang, 2006: Estimation of paddy rice crop coefficients for Penman-Monteith and FAO modified Penman Method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **48**, 13-23. (in Korean with English abstract)