



꿀벌의 월동 폐사와 실종에 대한 기온 변동성의 영향

이승재*, 김수현, 이재용, 강정혁, 이승민, 박형준, 남재철¹, 정철의²

국가농림기상센터 연구개발부, ¹서울대학교 식물생산과학부, ²국립안동대학교 농업과학기술연구소

Impact of Ambient Temperature Variability on the Overwintering Failure of Honeybees in South Korea

Seung-Jae Lee*, Su-Hyun Kim, Jaeyong Lee, Jung-Hyuk Kang, Seung-Min Lee, Hyung Jun Park, Jaecheol Nam¹ and Chuleui Jung²

Department of Research and Development, National Center for Agro-Meteorology, Seoul 08826, Republic of Korea

¹Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

²Agriculture Science and Technology Research Institute, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea

Abstract

To examine the relationship between overwintering failure, including mortality, the disappearance of honeybees, and ambient temperature variability, a meteorological analysis of late fall and early winter was conducted based on a daily automated synoptic observing system and automatic weather station data obtained from the Korea Meteorological Administration. There were three main results from this analysis. First, Jeollanam-do (particularly Yeongam-gun) experienced a dramatic temperature change. The area experienced abnormally high temperatures in early October 2021 with a subsequent drastic drop to an abnormally cold temperature on October 17, 2021. This clearly confirmed the possibility that the creation of winter bees for the winter was disrupted. The second result indicated that, from November to early December 2021, average temperatures of 12°C or more occurred over several days. This may have enabled winter clusters of honeybees to produce eggs, and the subsequent activity of brood rearing would shorten winter bee longevity. The third result was found in January and February 2022, where it was suspected that abnormally high temperatures would encourage honeybees to forage outside but then fail to return.

Keywords

Overwintering failure, Honeybee mass disappearance, Winter bees, Temperature variability, Climate change

서론

지구계는 땅, 공기, 물, 생명이 하나가 된 전체로서 움직이며 기능을 하고 있다. 소위 지권, 기권, 수권, 생권으로 표현되는 권역들(spheres)은 서로 영향을 주고 받으며 거미줄처럼 얽혀 있다. 태양 활동, 지구 궤도, 판 구조 등에 변화가 발생하면 이러한 상호 작용들을 모두 거친 후 최종적인 결과가 각 권역에 나타나게 되며, 이를 이해하고

예측하는 것은 고도로 어렵고 복잡한 작업이다. 인간의 교란과 내적 변동성은 이러한 작업을 더욱 힘들게 만든다 (Lee *et al.*, 2012). 인간은 지표면 이용과 피복 변화, 농경 활동, 산림벌채, 도시화 등을 통해서 지권을 교란하고, 온실가스와 연기와 에어로졸을 배출하여 기권을 교란하며, 댐을 만들고 관개 시설을 짓고 인공 연못을 만들어 수권에 교란을 가한다. 특히나 전쟁과 같은 일은 생태계를 파괴하고 모든 권역에 심각한 타격을 입힌다. 그러나, 인간

의 교란이 있지만, 복사 수지, 물의 순환, 탄소의 순환 등 자연은 각 권역 간의 상호 작용을 통하여 전체적으로 균형과 수지를 맞추고 있다. 지난 1,000년의 기온 변화를 보면 산업 혁명 이후 기온의 가파른 증가세가 나타난다. 이러한 전 지구 온난화는 자연적인 변동도 들어 있지만 인간의 산업 활동을 통해 온실 가스 배출로 인한 인위적인 증가의 측면이 더 크다는 것이 대다수 과학자들의 생각이며, 이를 뒷받침하는 증거들도 많다. 특히 우리나라는 전 세계 온난화 속도보다 더 빠르게 온난화가 진행되고 있다 (KMA, 2020). 온난화 상황에서는 극한 기후들의 출현 빈도가 증가하며, 각종 이상기상 현상들이 지표면 생태계에 나타나 크고 작은 영향을 미칠 수 있다.

꿀벌의 생태와 생리는 온도에 대하여 민감하며 기온 변화에 의하여 그 활동이 크게 좌우된다. 꿀벌의 과냉각 점, 발육정지 온도, 늦가을 월동봉구 형성 온도, 월동봉구 내부 온도, 여왕벌의 산란 온도, 꿀벌의 먹이활동 및 자유비행가능 온도 등에 대하여 기준 온도와 범위가 알려져 있다. 가령, 꿀벌의 치사 온도는 48~50°C로 알려져 있다 (Baker, 2020). 이는 말벌의 치사 온도보다 더 높는데 꿀벌이 말벌을 공격할 때 뭉쳐서 열을 발생시켜 죽임으로써 알 수 있다. 온도는 꿀벌의 수명에도 영향을 미친다. Lee *et al.* (2015)의 연구에 의하면, 저온에서는 능동적인 운동열 발생, 고온에서는 체내 단백질 변성 등으로 35°C가 꿀벌 생존에 최적온도이다. 우리나라 양봉에 사용되는 꿀벌은 재래꿀벌 (*Apis cerana*), 양봉꿀벌 (*Apis mellifera*)이다. 양봉꿀벌은 날기 위해서는 35°C의 내부 체온이 필요하며, 이 온도는 알을 낳는 데 최적의 온도이기도 하다. 비행 근육의 온도를 조절하는 행동 및 생리학적 메커니즘으로 인하여 30°C 이상의 기온 범위에서 먹이를 찾을 수 있다 (Human *et al.*, 2006). 여기서 이야기하는 메커니즘은 비행 전 떨림, 추가적인 떨림을 위한 비행

중지, 일에 따른 수동적 체온 조절, 역류된 꿀주머니 내용물로 인한 증발 냉각을 의미한다. 벌집에 온도가 높아지면 일벌이 물을 모아와서 물방울을 뿌려서 온도를 낮춘다 (Human *et al.*, 2006). 먹이 채집을 위한 최적의 공기 온도는 22~25°C이며, 7~10°C 미만의 꿀벌은 움직이지 않으며 38°C 이상에서는 활동이 느리고 다기간 동안 최대 50°C의 온도를 견딘다 (Bernd, 1979). 재래꿀벌을 포함한 동양꿀벌은 양봉꿀벌과 유사한 메커니즘을 사용하여 유사한 정밀도로 내부 벌집 온도를 유지한다. 주변 온도가 12~36°C 사이에서 변하는 동안에도 33~33.5°C 범위의 체온을 유지하며 여름 기간 더운 날씨에 등지 밖에 모여 날개를 부채질하여 등지에서 과도한 열과 습기를 제거하고 벌집의 온도를 낮춘다 (Jones and Oldroyd, 2007).

최근에 꿀벌 집단 폐사와 대량 실종 관련 뉴스가 보도가 되었다. SBS ‘[마부작침] 꿀벌 실종 사건이 나에게 미치는 영향은?’ (2022.03.27.)에서는 전국 꿀벌 실종 현황을 종합하고 있다. 전남은 벌통의 43%에서 꿀벌이 집단 실종하였고 피해 벌통 규모는 무려 10만 5,900여 군, 경남은 321개 농가의 벌통 38,433군에서 피해가 발생하였고 경남 지역 벌통의 11.1%가 피해를 입었다. 제주 양봉농가의 31.3%에서 꿀벌 피해가 발생하여 전체 벌통 74,216군 중 15.1%에서 꿀벌이 사라졌고, 충북 양봉농가의 벌통 25만 9,000개 중 19.7%인 5만 1,000개에서 꿀벌이 실종되었다. 특히 전남, 경남, 제주 지역의 피해가 크다고 밝히고 있다 (Table 1). 경향신문 ‘그 많던 꿀벌은 어디로 갔을까...2022년 꿀벌 실종 사건의 전말’ (2022.03.31.)에 따르면 농진청에서 전국 9개도 34개 시·군 99호 양봉농가 대상으로 1월 7일부터 2월 24일까지 전국적 조사를 실시했으며, 꿀벌응애류, 말벌류에 의한 폐사와 이상기상 요인의 복합적 결과로 결론지었다. 또한 기사에서는 기후 변화로 인한 꽃 생태 변화 → 꽃의 꿀 확보 감소 → 꿀벌 영

Table 1. Damage due to the disappearance of honeybees in the first quarter of 2022

Region	Total number of bee hives (number in one unit)	Amount of damage (number in one unit)	Damage ratio
Jeonnam	246,300	105,900	43.0%
Gyeongnam	350,000	38,433	11.1%
Jeju	74,216	11,133	15.1%
Chungbuk	259,000	51,000	19.7%

Source: SBS (2022.03.27.)

양소/면역체계 악화를 원인으로 지목하며 ‘악재의 연결고리’라고 표현하고 있다. 갑작스런 강설, 강풍, 강우 및 우박, 낙뢰 등이 잦아지는 기후 변화도 꿀벌 활동에 악영향을 미쳤을 것으로 보고 있다. MBC ‘전국 꿀벌 실종사태.. 과일값 폭등 식량위기로 이어지나’ (2022.04.04.)에서는 남부지방에서 주로 발생하던 꿀벌 실종 현상이 경기도 고양시에서도 발견되면서 전국적으로 퍼지고 있음을 지적하였다. 고양시의 한 꿀벌 농장에서 벌통 5백개 중 2백여개만 벌이 있으며 절반 이상이 비어 있다고 한다. 꿀벌 실종으로 꿀벌에 의존하던 꽃가루받이가 감소하여 과채류 생산에 차질 발생이 우려되고 있고, 2006년 미국 꿀벌 실종으로 촉발됐던 식량위기가 반복될 기미를 보이고 있다고 지적하였다.

국내의 연구자들은 꿀벌의 폐사 혹은 실종에 대해서 병해충, 질병, 화학약제뿐만 아니라 기후 변화를 주요 요인으로 꼽는다(Watanabe, 2008; Steinhauer *et al.*, 2014; Jung, 2015). 국외 사례의 경우, Switanek *et al.* (2017)에서는 2009년~2014년 오스트리아에서 월별 기후 변수와 꿀벌의 겨울철 사망률의 통계적 상관관계를 조사하였다. 해당 연구에서는 연구 기간 동안 총 4,983명의 양봉인들이 참여하였고, 전체 벌통 중 꿀벌이 대량 손실된 벌통의 수를 백분율로 계산하였다. 연구 결과로 꿀벌이 사망한 직전 달에서 기온이 상대적으로 더 따뜻했을 경우, 그 다음 달에 꿀벌의 개체수가 줄어드는 경향을 보였다고 말한다. 특히 겨울의 막바지 2월달에 급작스럽게 낮은 기온이 발생했을 때 꿀벌의 사망률이 증가했다고 분석하였다. Becsi *et al.* (2021)은 기후 변화와 꿀벌 사망의 상관관계를 조사하기 위해 2011년~2020년 오스트리아에서 수집된 26만여 개의 벌통에서 수집된 데이터를 사용하였다. 꿀벌의 손실은 여왕벌에게 문제가 생긴 경우, 꿀벌 사망(시체), 실종(빈 벌통)에 대한 사례를 집계하여 데이터로 사용하였다. 연구 결과 꿀벌의 사망과 높은 상관관계를 지닌 기후 영향은 극한의 한파, 온화한 겨울 날씨(1월~2월 5°C 이상) 순으로 나타났다.

국내의 연구자들은 꿀벌의 사망과 기후 변화에 대한 직접적인 연구 사례가 부족함에도 간접적인 지표들 통해 기후 변화에 대한 영향을 연구하였다. Flores *et al.* (2019)은 지중해 지역에서 기후 변화가 꿀벌에 미칠 수 있는 영향을 조사하기 위해 기온, 강수와 벌통의 무게 간 상관관계를 통해 연구를 수행하였고, Van Esch *et al.* (2020)은 2월~

3월에 발생한 서리일수가 겨울철 꿀벌 사망률과 상관성이 높다는 연구를 수행하였다. 해당 연구는 여름이 길어지는 ‘over-summer’라는 현상이 발생할 경우 꿀벌들이 식량 비축만 하고 채집활동을 하지 않아 겨울철 꿀벌 실종이 발생할 가능성이 높아질수 있다고 지적하였다. 기후 변화는 꿀벌 사망에 치명적인 영향을 미치는 꿀벌응애 (*Varroa destructor*)나 병해충에 의한 피해에도 영향을 미친다(Rosenkranz *et al.*, 2010). Jung (2015)은 미래기후 자료와 꿀벌응애 개체군 동태를 모의 연구하여 꿀벌응애의 영향이 향후 더욱 커질 것이라는 점을 시사하였다. Hosni *et al.* (2022)은 꿀벌부채명나방 (*Galleria mellonella*)에 의한 병해충 피해와 기후예측 시나리오 간의 상관관계 분석을 통해 꿀벌의 서식지에 점점 더 많은 꿀벌부채명나방도 서식할 수 있다는 점을 나타냈다. 하지만 국내의 기후 변화가 꿀벌 군체의 사망률에 미치는 영향을 직접적으로 연구한 사례는 거의 없다. 특히, 꿀벌의 생태와 관련하여 10월 겨울별 양성시기와 겨울(12월) 월동봉구 형성시기에 대하여 기온 변동성을 분석한 결과는 부족하다. 따라서, 본 연구에서는 최근 보고된 꿀벌 집단 폐사와 대량 실종 현상들이 우리나라의 지역적 기후 변화 및 기온 변동성과 어떠한 관련성이 있는지를 알아보기 위하여, 대표적인 피해 지역에 대하여 겨울별 생산과 수명 단축에 미칠 수 있는 기상학적 영향 가능성을 장기간의 기후데이터를 기반으로 제시하고자 하였다.

자료 및 방법

1. 기상청 관측소 및 자료

기온 분포를 알아보기 위해 기상자료개방포털에서 제공하는 우리나라 기후 평년값과 전국 ASOS (Automated Synoptic Observing System), AWS (Automatic Weather Station) 관측 자료를 사용하였다. 분석 변수는 온도 급변 사례에 대해서 분석하기 위해 기후 자료는 2021년 10월 10일과 17일의 평년 평균기온, 평년 최고기온, 평년 최저기온, 기상 자료는 평균 최고기온, 평균 최저기온을 사용하였고, 겨울철 기온 변화를 분석하기 위해 기후 자료는 평년 겨울철 평균기온, 평균 최고기온, 평균 최저기온, 기상 자료는 겨울철 평균기온, 평균 최고기온, 평균 최저기온을 사용하였다.

Table 2. Summary of the data used in the time series analysis

Data used for time series					
Region	City	Code	Type	Period	Variable
Metropolitan	Gwangju	156	ASOS	Jan. 1992~Feb. 2022	
Jeollanam-do	Jangseong	730	AWS	Jan. 1997~Feb. 2022	T, Tmax, Tmin
	Yeongam	731	AWS	Jan. 1997~Feb. 2022	
Jeju-do	Jeju	184	ASOS	Jan. 1992~Feb. 2022	
	Seogwipo	189	ASOS	Jan. 1992~Feb. 2022	

T: Daily mean temperature, Tmax: Daily maximum temperature, Tmin: Daily minimum temperature

꿀벌의 집단 폐사 및 실종과 기온의 연관성을 확인하기 위하여 기상청의 ASOS와 AWS 일 기온 자료도 수집하였다. 기상청 일 기온 자료는 전라남도에 위치한 광주, 장성, 영암 지점과 제주도에 위치한 제주, 서귀포 지점의 일 평균기온, 일 최저기온, 일 최고기온을 수집하였다. 자료의 기간은 ASOS에 속하는 광주, 제주, 서귀포의 경우 1992년 1월부터 2022년 2월까지, AWS에 속하는 장성과 영암의 경우 1997년 1월부터 2022년 2월까지이다. 전체 기간에 대하여 수집된 자료는 꿀벌의 월동봉구가 시작하고 진행되는 10월부터 2월까지의 자료를 추출하여 사용하였다. 이 가운데 전라도에 위치한 영암 지역을 중심으로 분석을 수행하였으며 그 외 자료의 경우 부록으로 정리하였다. Table 2는 시계열 분석에서 사용된 지점과 기간 그리고 변수에 대한 요약을 보여준다.

2. 겨울벌 생산 및 수명 관련 기준 기온

본 연구에서 직접 또는 간접적으로 사용한 꿀벌 생리 상태 관련 주요 온도들은 다음과 같다. 꿀벌의 과냉각점은 영하 8°C이고(Qin *et al.*, 2019; Muhammad and Jung, 2021), 최저 활동 온도는 6~7°C이다(Southwick and Heldmaier, 1987; Eskov and Toboev, 2011). 늦가을 월동봉구 형성을 위한 온도는 10~14°C로 3일 이상 내려가는 경우이다(Southwick and Heldmaier, 1987; Stabentheiner *et al.*, 2010). 월동봉구의 내부 온도는 육아하지 않을 경우엔 20~25°C이고(Winston, 1987), 육아할 때에는 35°C이다(Stabentheiner *et al.*, 2010). 월동봉구 외벽 온도는 6~7°C이고(Eskov and Toboev, 2011), 월동봉구 내 산란이 일어날 수 있는 조건은 월동봉구 형성 후 외부 온도가 12°C 이상 3일 이상 지속될 때이다(Winston, 1987). 꿀벌의 최

저, 최적, 최고 지속비행가능 외부 온도는 각각 11~12°C(Southwick and Heldmaier, 1987), 20~25°C(Southwick and Mugaas, 1971; Seely and Visscher, 1985), 35~38°C(Southwick and Moritz, 1987)이다. 최저 비행가능 외부 온도는 5~6°C(가령, 이른 봄 배설비행 등 짧은 거리)이고(Winston, 1987), 외부 온도가 10°C는 되어야 지속적 비행을 위한 가슴온도(28°C) 유지가 가능하다.

월동을 위한 겨울벌 생산은 추분인 9월 23일부터 10월 23일까지 1달 동안 일어난다. 이 시기에 낮 시간 온도가 12°C 이하로 떨어지면 겨울벌 생산에 차질이 발생한다. 그 이유는 10월에 기온이 12°C 이하로 떨어지면 꿀벌이 먹이활동을 못하고, 꽃가루 수집 등이 어려워지며, 내부에서는 여왕벌을 중심으로 에워싸는 보온 활동을 해야 하므로, 여왕벌의 산란이 제한되기 때문이다. 이후 11월부터 낮 시간 온도가 12°C 이상이 3일 이상씩 있으면(특히 12월 초) 월동봉군에서 산란이 시작되어, 겨울벌의 수명이 단축된다. 그 이유는 겨울벌은 생리적으로 여름벌(=활동벌=육아벌)과 달리 수명이 150일 정도로 길며 육아를 하지 않는데, 12월 초 고온 현상으로 육아를 시작하면 체내 호르몬 구성, 생리가 달라져, 수명이 40여 일로 줄어들기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 12°C 기온선(Figs. 7a, 9a, 11a에서 녹색선)을 분석 시에 기준 온도로 활용하였다.

3. 시공간 분석 방법

기온의 공간 분포 분석을 위해 MATLAB 2022a를 사용하였고, 지형 자료는 국가공간정보포털(data.nsd.go.kr)에서 제공하는 법정동(시군구) 경계도면에 대한 Shape 포맷의 자료를 사용하였다. 분석 방법은 기후 평년 자료를

제공하는 관측소와 일치하는 ASOS, AWS 관측소의 데이터를 추출하고 anomaly를 계산하여 해당 지역에 온도 범위별 색을 입혀 남한에 대해서 표출하였다.

지점별 기온의 시계열과 정규분포도 확인하였다. 시계열과 정규분포는 기상청의 ASOS/AWS 지점에서 수집한 일 평균기온과 일 최저/최고기온 자료를 평균, 표준편차, 정규분포로 Python 3.7과 Numpy 라이브러리를 통해 수행하였으며, 그림의 경우 Matplotlib 라이브러리를 통해 작성하였다. 구체적인 계산 방법은 다음과 같다. 1) 연도별로 각각의 월 평균기온과 월 평균기온의 표준편차를 계산하고 시계열로 작성하였다. 이 과정에서 계산된 월 평균기온과 표준편차를 활용해 평년값으로 변환하여 2021년 10월부터 2022년 2월까지 각각의 월 평균기온과 월 평균기온의 표준편차를 평년값과 비교하였다. 2) 연도별로 각 월 평균기온과 표준편차의 평균을 이용하여 정규분포로 변환하였다. 그리고 2021년 10월부터 2022년 2월까지의 월 평균기온이 분포하는 위치를 표시하고 확률밀도함수(probability density function)로 표현하였다. 3) 각 월에 대한 일 기온 시계열을 작성하였다. 일 기온 시계열에는 최근 월동봉구 기간에 대한 일 평균기온, 일 최저기온 그리고 일 최고기온을 표시하였으며, 앞선 기간을 제외한 일 기온 자료를 평년값으로 변환하여 비교할 수 있도록 동시에 표시하였다.

꿀벌은 기후 변화에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Flores *et al.*, 2019). 지구 온난화에 의해 발생한 전 세계적인 기후 변화는 다양한 지역에서 극한 기상 현상을 유발함에 따라 기상 이변이 증가하는 추세이다(Rahmstorf and Coumou, 2011). 이러한 기후 변화는 국내에도 영향이 나타남에 따라 꿀벌의 월동에 큰 영향을 줄 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 추가로, 지점별 ‘일 평균기온 자료’와 앞서 계산된 ‘월 평균기온과 표준편차’를 활용해 이상기온을 탐지하였다. 이상기온을 탐지하는 방법은 ‘월 평균기온과 표준편차’를 통해 기온의 정규분포를 작성하고 이 분포상에서 문턱값보다 크거나 작은 경우 이상기온으로 탐지하였다.

이상고온 또는 이상저온을 판단하는 기준은 각 기관별로 다양한 기준을 사용하고 있다(Table 3), 본 연구에

Table 3. Definition of extreme climates in air temperature

Agency	Definition
KMA	10%ile or 90%ile
IPCC	10%ile or 90%ile
WMO	Occurs once in 20 years
BOM	1, 3%ile or 97, 99%ile
UK Met office	Updating the max or min value
Meteo-France	20%ile or 80%ile
JMA	Outside of $\pm 1.83\sigma$

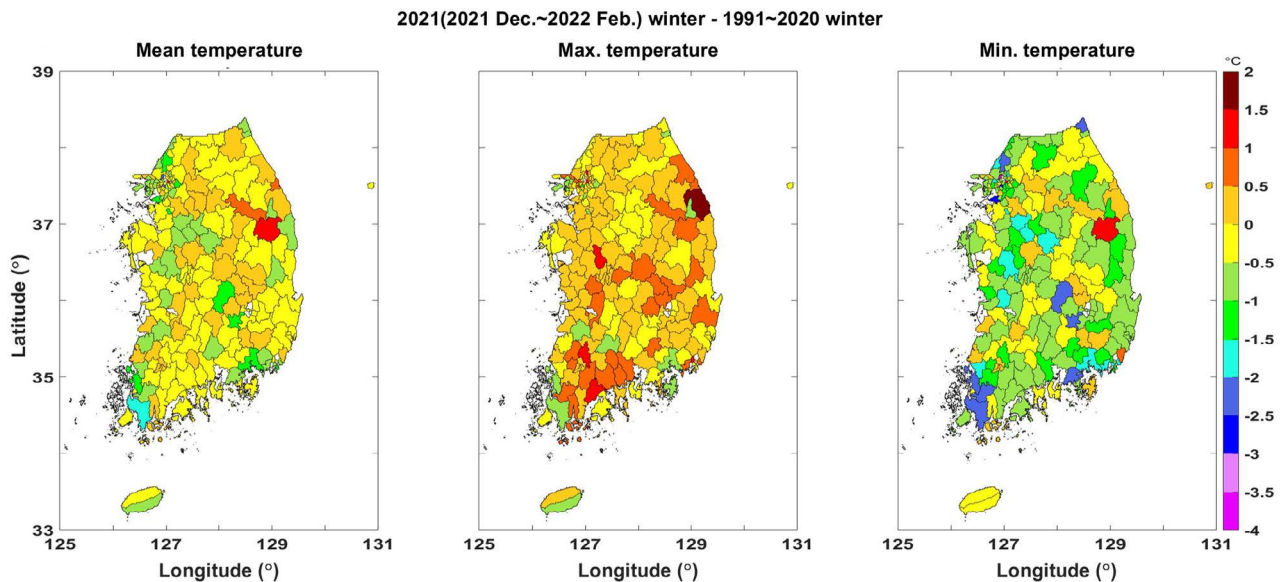


Fig. 1. Temperature difference between the recent winter and the 1991~2020 winter.

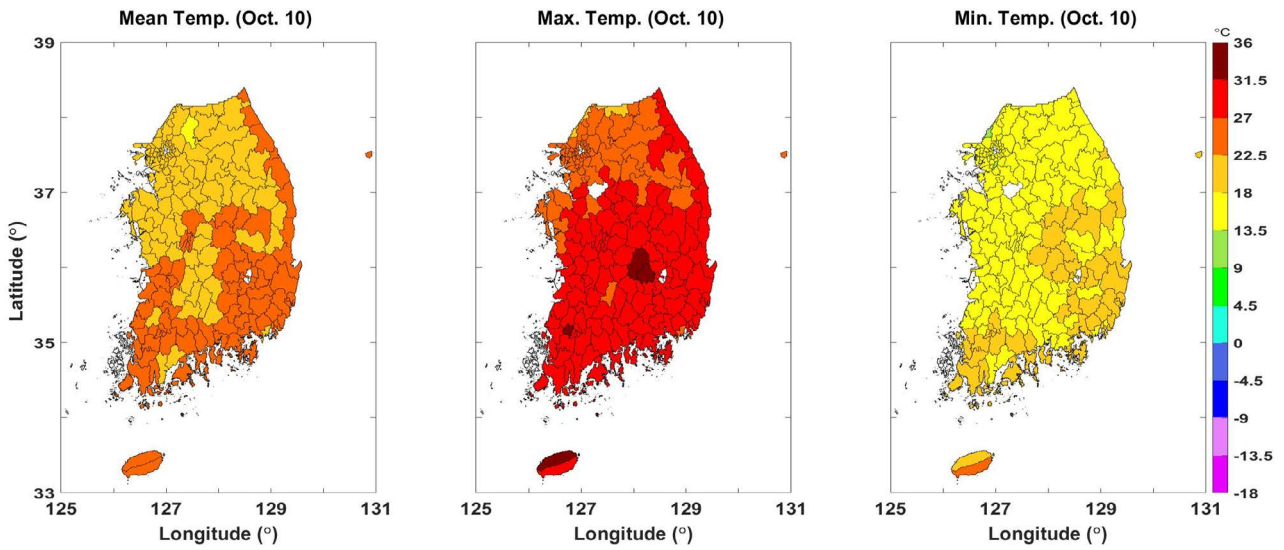


Fig. 2. Distribution of mean temperature, maximum temperature, and minimum temperature on October 10, 2021.

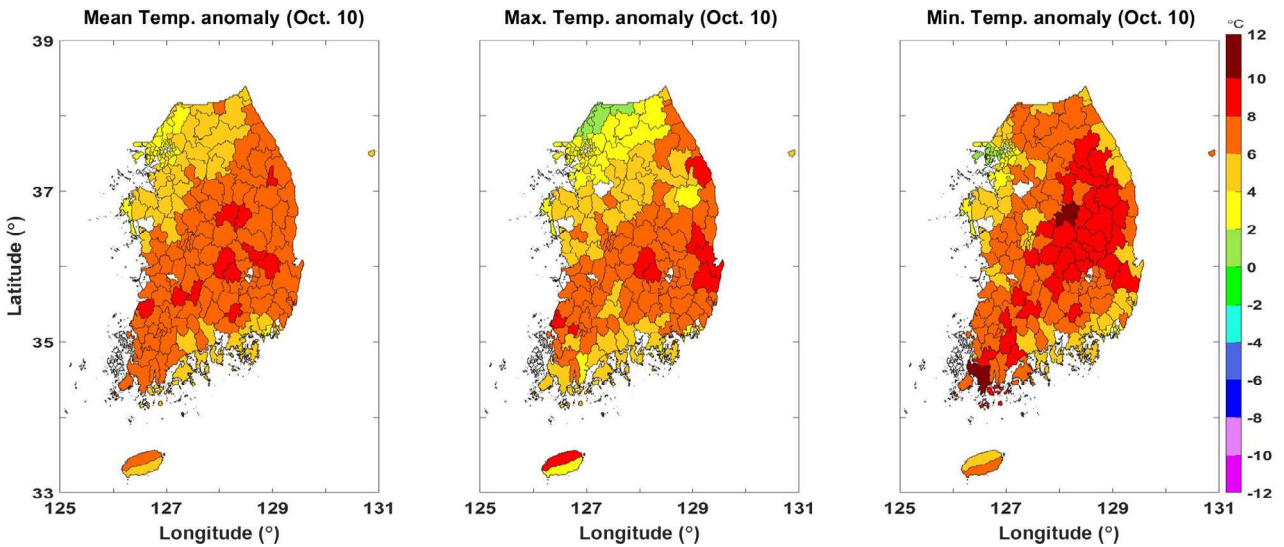


Fig. 3. The difference between the mean temperature of October 10, 2021, and October 10, 1991~2020.

서는 기상청과 기후 변동에 관한 정부 간 패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 정의하는 이상저온과 이상고온의 기준인 10%ile와 90%ile 그리고 매우 엄격한 $\pm 2.0\sigma$ (2.5 및 97.5%ile)를 기준(Ha *et al.*, 2004)으로 사용하였다. 10%ile와 90%ile를 ‘준 이상기온’이라고 정의하여 각각의 문턱값을 넘는 경우 ‘준 이상저온’과 ‘준 이상고온’으로 정의하였고, 더욱 엄격한 문턱값을 보이는 $\pm 2.0\sigma$ 의 경우 ‘이상저온’과 ‘이상고온’으로 정의하였다.

결과 및 고찰

1. 공간 분포

1) 평년 겨울과 최근 겨울

최근 겨울철(2021년 12월~2022년 2월)과 평년의 기온 차이를 알아보기 위해 공간 분석을 수행하였다(Fig. 1). 전반적으로 최근 겨울철의 평균기온은 평년 평균기온보다 낮게 관측되었고, 전남, 경남, 경기 일부 지역에서 최근 겨울철 평균기온은 평년 평균기온보다 1~2°C 낮게 관측

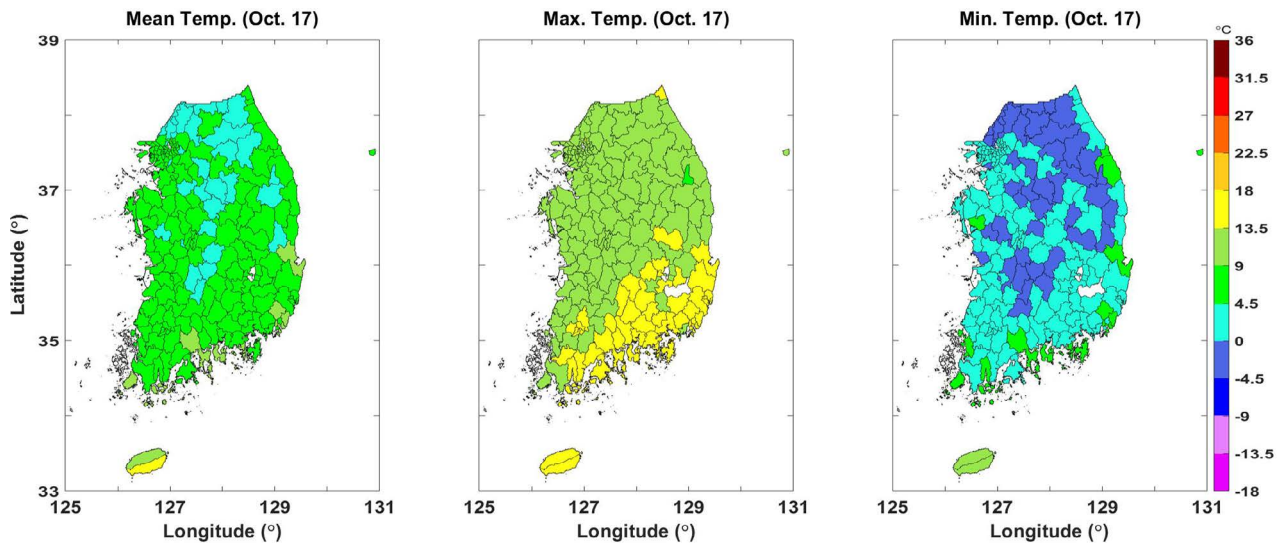


Fig. 4. Distribution of mean temperature, maximum temperature, and minimum temperature on October 17, 2021.

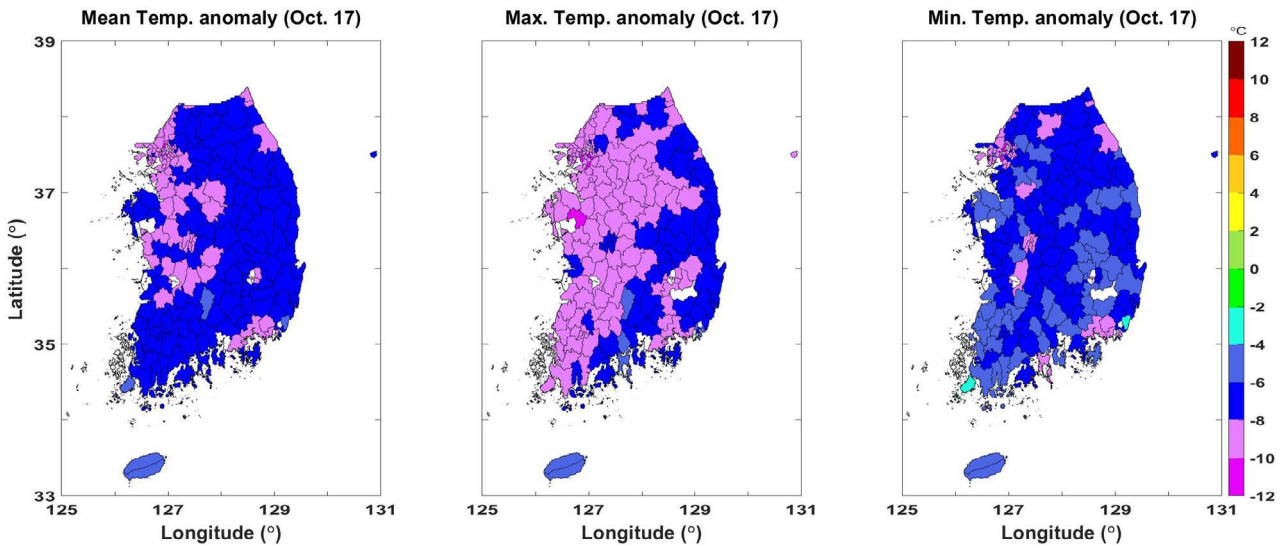


Fig. 5. The difference between the mean temperature of October 17, 2021, and October 17, 1991~2020.

되었다.

최고기온의 경우 대부분의 지역에서 최근 겨울철이 평년 최고기온보다 0~1°C 높게 관측되었고, 전남 일부 해안 지역과, 동해안, 경기도 일부 지역에서는 평년 최고기온보다 최근 겨울철 최고기온이 1°C 이상 높게 관측되었다.

최저기온의 경우 대부분의 지역에서 평년 기온보다 낮게 관측되었고, 전남과 경남, 경기도, 강원도 일부 지역에서 최근 겨울철 최저기온이 평년 최저기온보다 2~3°C 더 낮게(파란색) 관측되었다. 이는 최저기온이 관측되는 새

벽 시간의 기온이 평년보다 더 추웠음을 의미한다. 꿀벌 피해가 가장 심하게 발생한 전남 지역(영암군, 해남군, 함평군, 곡성군, 장성군) 중 영암군(붉은색 원), 해남군(주황색 원)은 2~2.5°C, 함평군(보라색 원)은 1.5~2°C, 곡성군, 장성군은 0~0.5, 0.5~1°C 정도 최저기온이 감소하였다.

이러한 겨울철 전체에 대한 장기간 대상 분석은 그 안에서의 단기적인 기온의 증감을 확인하기 어렵다. 따라서, 꿀벌 실종이 많이 발생한 남부, 특히 전라남도에 대해서 꿀벌 생태 관련 주요 월을 대상으로 일별 상세 분석을 진행하였다.

2) 일별 분석: 2021년 10월 10일과 17일 사례

2021년 10월 기온이 급감한 사례에 대해서 전국적으로 기온 변화를 알아보기 위해 공간 분석을 수행하였다(Fig. 2). 10월 10일 일 평균기온과 최저기온은 전국 대부분의 지역이 13.5°C 이상으로 관측이 되었고, 일 최고기온은 최대 31.5~36°C까지 관측되었다. 특히, 남부와 동해안 지역에서 높은 평균기온이 관측되었다.

10월 10일에 대해서 평년 기온과의 차이를 알아보기 위해 추가적인 공간 분포 분석을 수행하였다(Fig. 3). 전국적으로 평년 기온, 최고기온, 최저기온보다 높은 기온이 관측되었고, 전라남도 해남군과 경상북도 문경시에서는 평년보다 최저기온이 10~12°C 높게 관측되었다.

전국적으로 13.5°C 이상의 기온이 관측되었던 10월 10일과 비교하여 기온이 감소한 10월 17일은 제주도 남부와 일부 지역을 제외하고 9~4.5°C 이하의 평균기온이 관측되었다(Fig. 4). 최고기온은 전국 대부분의 지역에서 22.5~27°C 이상이 관측되었던 10일과는 다르게 최대 13.5~18°C의 기온이 남한의 남쪽 지역에서 관측되었고, 나머지 지역에서는 이보다 낮게 관측되었다. 최저기온이 13.5~18°C 범위에 해당하던 10일과는 다르게 17일은 4.5~9°C 범위가 가장 높은 값으로 관측되었다.

10월 17일 평균기온은 남한의 전 지역에서 평년 평균기온보다 낮게 관측되었으며, 최대 8~10°C 낮게 관측된 지역이 존재하였다(Fig. 5). 최고기온과 최저기온도 평년 기온보다 전국적으로 낮게 관측되었고, 최고기온은 10~12°C 낮게 관측된 지역이 존재하였다.

2. 전남 영암 지역 시계열 및 빈도 분석

Fig. 6a는 영암 지역의 1997년부터 2021년까지 연별 10월 월 평균기온을 보여준다. 그림을 살펴보면 월 평균기온의 평년값은 약 15.5°C로 나타나고 2021년 10월의 경우 평년보다 약간 높은 16°C에 근접한 월 평균기온을 보였다. 이와 마찬가지로 영암 지역의 10월 월 평균기온의 정규분포(Fig. 6b)를 살펴보면 2021년 10월의 월 평균기온이 정규분포의 중심을 기준으로 오른쪽에 분포하고 확률 밀도 함수가 약 12%임을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 2021년 10월에 나타난 월 평균기온 값이 평년보다 조금 따뜻하고 기후학적으로도 큰 특징이 없음을 확인하였다.

연별 10월의 일 평균기온으로 계산된 표준편차 시계열

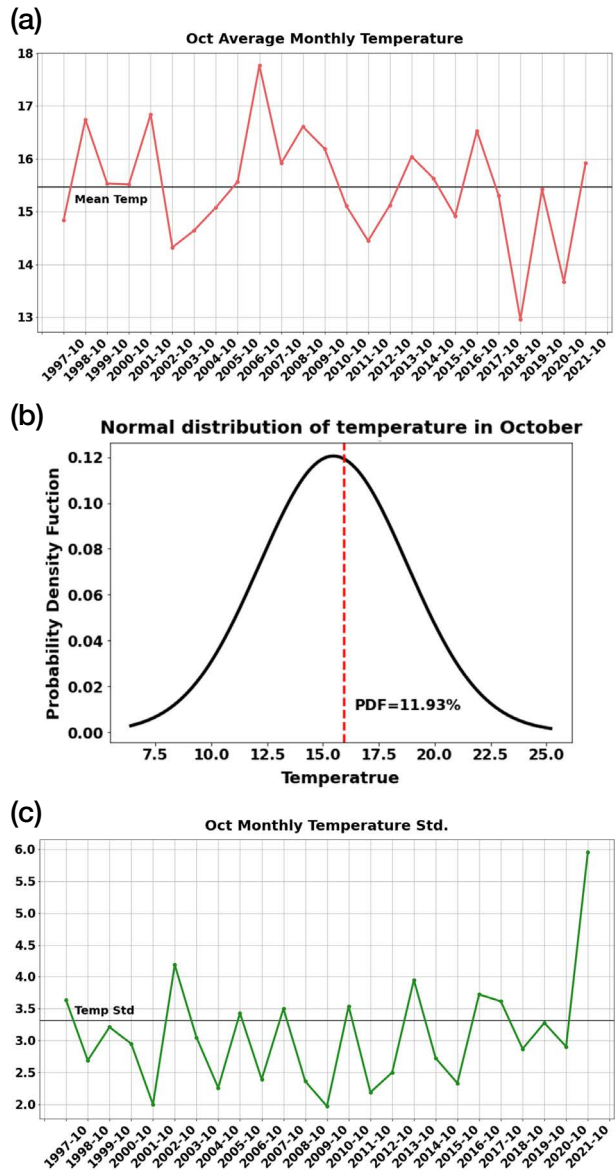


Fig. 6. Time series and normal distribution using October 2021 data in Yeongam area. (a) the time series of annual average monthly temperature, (b) the normal distribution of average monthly temperature, (c) the time series of the monthly standard deviation.

(Fig. 6c)을 살펴보면 영암 지역에서 평년 표준편차는 약 3.4°C로 나타났다. 하지만 2021년 10월의 표준편차를 살펴보면 약 6.0°C로 나타나 2021년 10월 영암 지역의 표준편차가 평년보다 약 1.8배 크기에 따라 일 평균기온의 변동성이 매우 컸음을 알 수 있다. 이러한 결과는 2021년 10월 영암 지역에서 평년과 다른 일 기온의 변동성에 의해 골별의 월동봉구에 영향을 미칠 가능성이 존재함을 시사한다. 따라서 2021년 10월 영암 지역에서 나타난 일 평균기

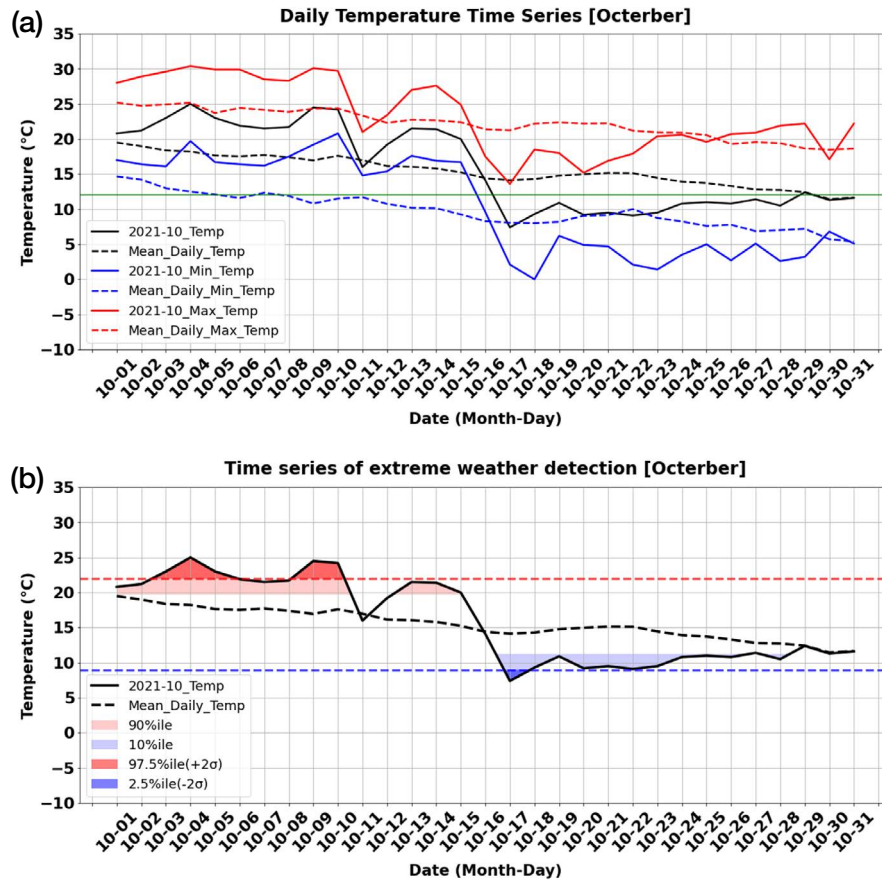


Fig. 7. Time series using October 2021 data in the Yeongam area. (a) the time series of daily temperature (Red line: Daily maximum temperature, Red dashed: Average of daily maximum temperature, Black line: Daily average temperature, Black dashed: Average of daily average temperature, Blue line: Daily minimum temperature, Blue dashed: Average of daily minimum temperature). (b) the time series of abnormal temperature detection (Black line: Daily average temperature, Black dashed: Average of daily average temperature, Red dashed: $+2\sigma$ position of the average monthly temperature, Blue dashed: -2σ position of the average monthly temperature, Pale blue shade: Semi-abnormally low temperature, Blue shade: Abnormally low temperature, Pale red shade: Semi-abnormally high temperature, Red shade: Abnormally high temperature).

온의 큰 변동성을 자세하게 확인하기 위해 영암 지역의 일 평균기온 시계열을 확인하였다(Fig. 7a).

2021년 10월의 영암 지역 일 평균 시계열(Fig. 7a)에서 붉은색은 일 최고기온, 검은색은 일 평균기온 그리고 푸른색은 일 최저기온을 의미하며 실선은 2021년 영암의 일 기온 자료, 파선은 2021년을 제외한 일 기온 자료의 평균을 의미한다. 그림을 살펴보면 영암 지역에서 2021년 10월 초순 다른 연도보다 높은 기온을 보임을 확인할 수 있다. 이러한 경향을 일 최저, 최고기온 그리고 일 평균기온 모두에서 기록하고 있다. 또한 2021년 10월 중순 초입에 기온이 하강하며 일 최고기온과 일 평균기온이 평년값에 근접하지만 최저기온의 경우 평년 대비 높은 기온을 기록하였다. 특히 영암 지역에서는 2021년 10월 10일 이

후에 기온 감소 시그널이 나타나기 시작하여 10월 15일 이후 기온이 급격하게 하강하는 모습을 보인다. 이때 일 평균기온을 기준으로 15일 약 20°C에서 17일 약 8°C로 기온이 12°C가 냉각됨을 보였다. 10일에 나타난 고온 현상과 비교하자면 최고기온의 경우 약 17°C 급강하, 최저기온의 경우 약 21°C의 급강하가 나타났고 심지어 빙점에 도달을 하였다. 이는 꿀벌의 월동봉구 형성에 매우 불리한 영향을 주었을 것으로 사료된다. 급감을 보인 기온은 이후 시간이 지남에 따라 회복되는 모습을 보이며 10월 말 평년과 유사함을 확인하였다.

2021년 10월 영암 지역에 대한 이상기온 탐지 시계열(Fig. 7b)에서 검은색 실선의 경우 2021년 10월 영암 지역의 일 평균기온을 의미하며, 검은색 파선은 2021년을 제

외한 일 기온 자료의 평균을 의미한다. 또한 옅은 파란색과 빨간색은 각각 준 이상저온과 준 이상고온을 의미하며, 파란색과 빨간색으로 채워진 날짜의 경우 이상저온과 이상고온을 의미한다. 그림을 살펴보면 영암 지역의 2021년 10월 초 이상고온 현상이 발생하였으며 이상고온 현상은 초순까지 이어지는 모습을 보였다. 이후 준 이상고온이 3일간 지속되고 기온이 급강하함에 따라 2021년 10월 17일 영암에 이상저온 현상이 발생하고 이후 준 이상저온 현상으로 일주일간 저온 현상이 지속됨을 확인하였다. 이상고온과 이상저온 현상이 연이어 나타남으로써 기온의 변이가 극적으로 나타났고 극심한 온도차로 인해 꿀벌의 생태와 생리에 큰 타격을 주었을 가능성이 높다.

10월 초의 이상고온은 필리핀해 부근에서 강한 대류활동이 지속되어 우리나라 남쪽으로 하강기류가 생성되었고, 이로 인하여 아열대 고기압이 이례적으로 평년보다 북서쪽으로 발달하여 우리나라로 따뜻한 남풍 기류가 유입된 까닭이다. 이어서 발생한 이상저온은 장기간 지속되던 필리핀해 부근의 대류활동이 약화됨과 동시에 중앙시베리아와 베링해 부근에 기압능이 발달하여 차가운 북서기류를 유도했고, 이 찬 공기가 우리나라 주변에 머물면서 발생하였다(기상청, 2021).

영암 지역의 1997년부터 2021년까지 연별 12월 월 평균기온 그림(Fig. 8a)을 살펴보면 월 평균기온의 평년값은 약 2.8°C로 나타나고 2021년 12월의 경우 평년과 유사한 월 평균기온인 2.9°C로 나타났다. 이와 마찬가지로 영암 지역의 1월 월 평균기온의 정규분포(Fig. 8b)를 살펴보면 2021년 12월의 월 평균기온이 정규분포의 중심에 근접한 분포를 보이며 확률 밀도는 약 11.5%로 나타났다. 이러한 결과는 2021년 12월의 월 평균기온이 평년과 같음을 의미한다. Fig. 8a와 동일한 기간에 일 평균기온 표준편차 시계열(Fig. 8c)을 살펴보면 영암 지역에서 평년 표준편차는 약 3.5°C로 나타났다. 하지만 2021년 10월의 표준편차를 살펴보면 약 3.4°C로 나타나 2021년 10월 영암 지역의 표준편차가 평년과 유사함을 확인하였다. 따라서 2021년 영암의 경우 월 평균기온, 표준편차에서는 평년과 유사함에 따라 기후학적인 특징을 확인할 수 없었다.

2021년 12월 영암 지역의 일 평균 시계열(Fig. 9a)에서 일 평균기온과 일 최저기온을 살펴보면 12월 초 평년과 유사함을 확인할 수 있다. 하지만 최고기온의 시계열

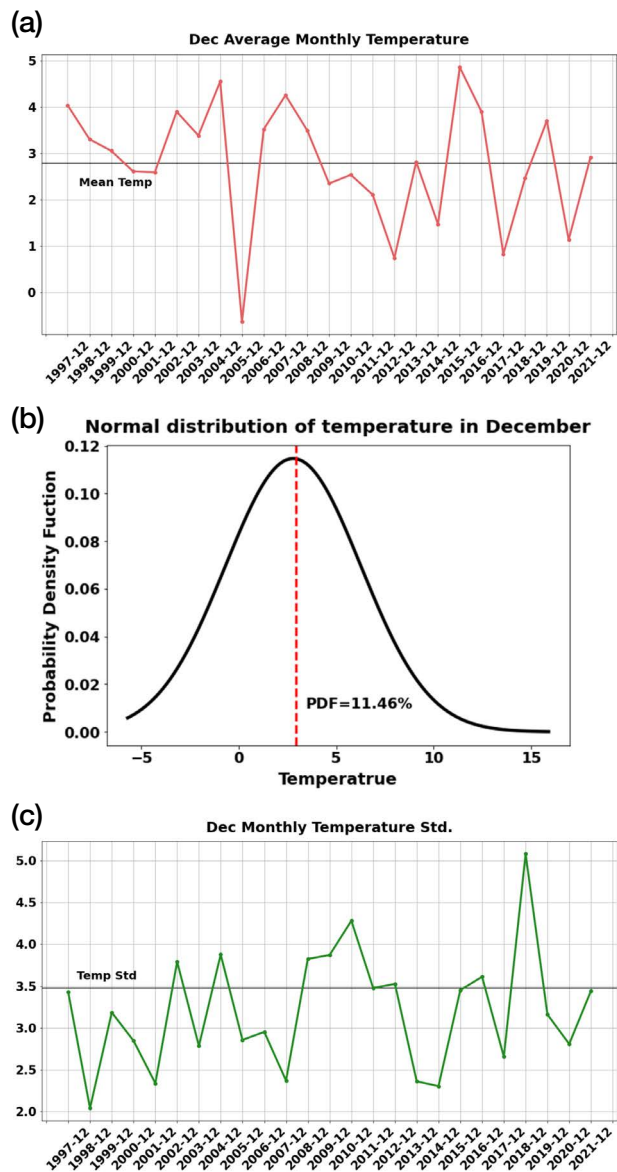


Fig. 8. Same as Fig. 6, but for December 2021.

을 살펴보면 겨울철임에도 불구하고 한낮의 기온이 12°C를 넘어 다수 나타남을 확인할 수 있다. 특히 12월 5일부터 12일까지 일주일 동안 고온 현상이 나타남을 알 수 있다. 꿀벌은 겨울철에 나타나는 고온 현상에 의해 수명이 단축될 수 있으므로 이러한 12월 초의 고온 현상은 꿀벌 생태와 생리에 악영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 이외에도 12월 하순 초입인 20일부터 23일까지의 기간 또한 최고기온이 12°C에 근접하게 나타났으며, 이후 기온이 하강하고 평년과 유사해짐을 확인할 수 있다.

2021년 12월 영암 지역에 대한 이상기온 탐지 시계열

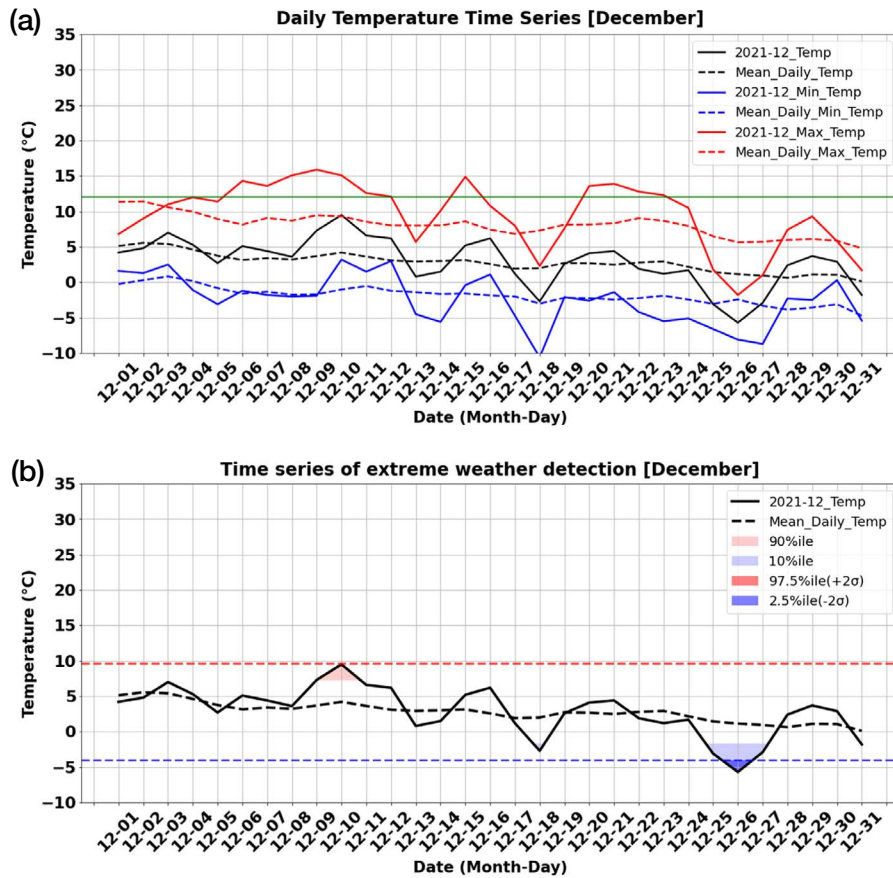


Fig. 9. Same as Fig. 7, but for December 2021.

(Fig. 9b)을 살펴보면 영암 지역의 2021년 12월 9일부터 11일까지 준 이상고온 현상이 발생함을 확인하였다. 앞서 분석된 일 기온 분석 시계열과 마찬가지로 12월 9일부터 11일까지 준 이상고온 현상이 발생됨을 확인하였다. 이외에도 12월 26일의 경우 이상저온 현상이 나타나고 전후로 준 이상저온 현상이 나타남을 확인하였다. 영암 지역뿐만 아니라 광주, 장성, 제주, 서귀포 지점 또한 12월 말에 준 이상저온 현상이 나타남을 확인하였다 (부록).

한편 영암 지역의 1997년부터 2022년까지 연별 1월의 월 평균기온 시계열(Fig. 10a)을 살펴보면 월 평균기온의 평년값은 약 0.8°C로 나타나고 2022년 1월의 경우 평년보다 약간 낮은 0.3°C에 근접한 월 평균기온을 보였다. 이와 마찬가지로 영암 지역 1월의 월 평균기온의 정규분포(Fig. 10b)를 살펴보면 2022년 1월의 월 평균기온이 정규분포의 중심을 기준으로 왼쪽에 분포하고 확률 밀도 함수가 약 11.5%임을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 2021년 10월에 나타난 월 평균기온이 평년보다 조금 한랭하

지만 기후적으로 충분히 나타날 수 있는 월 평균기온임을 확인하였다. 영암 지역의 1997년부터 2022년까지 연별 1월의 일 평균기온으로 계산된 표준편차 시계열(Fig. 10c)을 살펴보면 영암 지역에서 평년 표준편차는 약 3.4°C로 나타났다. 하지만 2022년 1월의 표준편차를 살펴보면 약 2.5°C로 나타나 2022년 1월 영암 지역의 표준편차가 평년보다 작아 변동성이 작음을 확인할 수 있었다.

2022년 1월 영암 지역의 일 평균 시계열(Fig. 11a)을 살펴보면 영암 지역의 1월 초부터 중순까지 대체로 평년과 유사하거나 낮은 기온을 기록함을 확인할 수 있다. 또한, 2022년 1월 하순 초입에 기온이 상승하여 평년보다 높은 기온을 기록하였으며 마찬가지로 일 최고기온 또한 크게 증가하여 약 13°C의 기온이 관측되어 평년과 비교하였을 때 약 7°C 높음을 확인할 수 있다. 2022년 1월 영암 지역에 대한 이상기온 탐지 시계열(Fig. 11b)에서 확인할 수 있듯이 평년과 유사하거나 낮은 일 평균기온을 1월 1일부터 20일까지 유지하였다. 이후 1월 22일에는 전일 대비

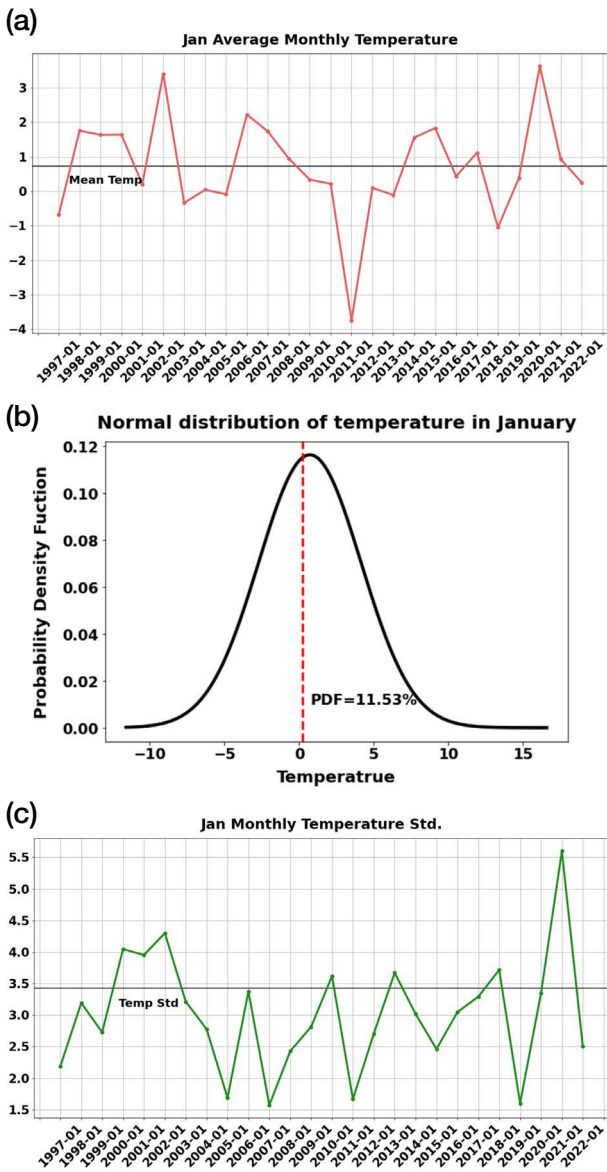


Fig. 10. Same as Fig. 6, but for January 2022.

기온이 약 9°C 상승함에 따라 이상고온 현상이 확인되었다. 하지만 이상고온 현상은 1월 22일에만 나타났으며 준 이상고온 현상의 경우 23일까지 지속되어 이상고온 현상이 비교적 짧게 나타났음을 확인하였다.

이상의 내용을 바탕으로, 2021년 9월 23일(추분)에서 10월 23일까지 1달 동안의 월동을 위한 겨울벌 생산과 이후부터 12월 초까지의 여왕벌 산란 기간에 대한 기온 분석 결과를 종합해 보면, 1) 10월달에 이상고온에 연이은 이상저온 발생으로 겨울벌 생산에 차질이 발생하고, 2) 11월~12월 초순의 고온 현상으로 겨울벌의 수명이 단축

될 수 있는 기온 환경이었음을 확인할 수 있었으며, 이는 꿀벌의 집단 폐사에 분명 일정 부분 기여할 수 있는 기상학적 요인으로 분석이 된다. 한편, 1월과 2월의 이상고온과 한파 현상은 꿀벌의 외출과 미복귀로 인한 대량 실종 가능성을 어느 정도 뒷받침하는 것으로 사료된다.

Fig. 12는 2021년 10월부터 2022년 1월까지 Figs. 7, 9, 11의 그래프를 묶어서 하나로 표현한 것으로서, 최근 꿀벌의 월동 폐사와 실종 기간에 대한 기온의 극적인 변동성을 한눈에 잘 보여준다. 영남 지역 외 다른 관련 지역들에 대해서도 유사한 기온 변동성을 보였으며 부록에 수록하였다.

본 연구에 이은 후속 연구로서, 1) 피해지역과 그렇지 않은 지역을 상세히 분류하여 비교군을 구체적으로 설정하여 심층 사례 연구를 수행할 필요가 있다. 2) 꿀벌 생태 관련 국내 기준을 지역별로 정교화하여, 전남 평지 지역 외에 다른 지역들에 대하여 차별화된 분석이 필요하다(가령, 전남 평지, 제주 도서 지역, 강원 산지 등 지역별로 접근). 3) 기온 변수 외에, 습도, 바람 등 다양한 기상 변수들에 대하여, 또 다른 계절에 대하여, 꿀벌 생태 및 기능에 대하여, 영향 평가가 필요하다. 4) 밀원수, 꿀벌응애, 농약, 바이러스, 전자기파 등 다른 기작들과 접목된 종합적 이해와 분석 틀이 필요하다. 가령, 농약에 노출이 누적된 꿀벌은 면역력과 체력이 저하되어서, 작은 기온 변동에도 견디지 못하고 취약해질 수 있다. 5) 농림지원에 특화된 고해상도 수치모델의 구축 및 운영(Lee et al., 2016)을 통해 피해발생 지역의 기온변화 예측가능성을 확보하고, 이를 기반으로 <꿀벌 기상>에 특화된 예측 및 조치 안내 서비스가 이루어져야 한다. 6) 양봉업자 및 농작업을 위한 맞춤형 다양한 기상 정보 개발이 필요하다. 이러한 사항들이 체계적으로 이행이 된다면, 현장 양봉 종사자들에게 더욱 의미 있고 꿀벌 폐사와 실종 예방에 도움이 되는 과학적 연구 결과가 나올 것으로 전망된다.

적 요

전 지구 온난화를 배경으로 우리나라 지역의 기후 변화가 어떠한 위치에 있는지를 이해하는 것이 중요하다. 우리나라는 전 지구 온난화 속도 이상으로 온난화가 진행 중이며, 온난화 상황에서는 기상 변동성이 커진다. 이러

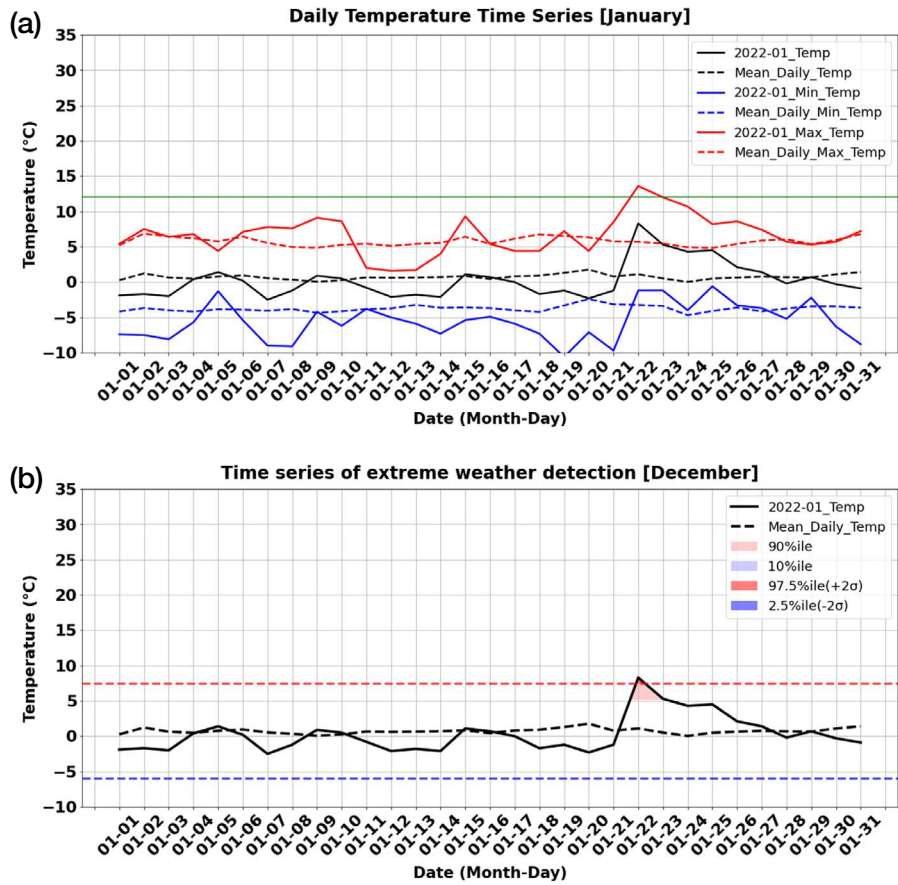


Fig. 11. Same as Fig. 7, but for January 2022.

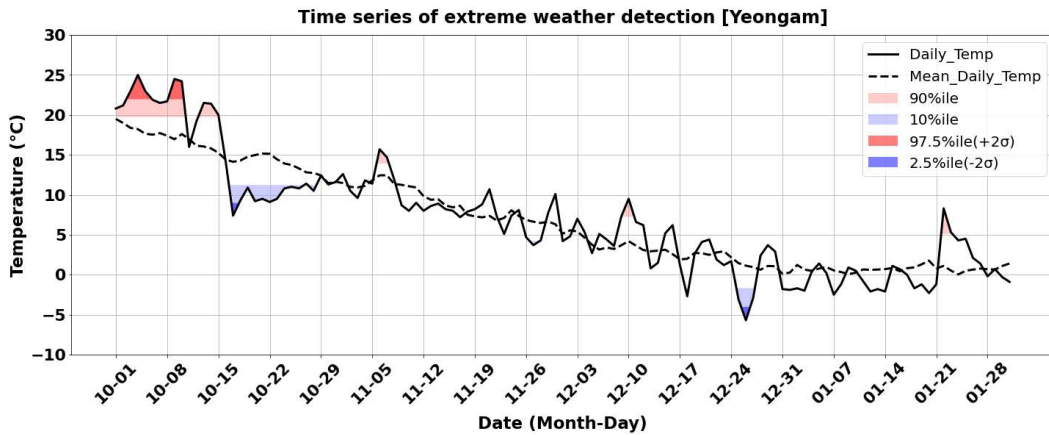


Fig. 12. The time series of abnormal temperature detection in the Yeongam area using data from October 2021 to January 2022 (Black line: Daily average temperature, Black dashed: Average of daily average temperature, Red dashed: +2σ position of the average monthly temperature, Blue dashed: -2σ position of the average monthly temperature, Pale blue shade: Semi-abnormally low temperature, Blue shade: Abnormally low temperature, Pale red shade: Semi-abnormally high temperature, Red shade: Abnormally high temperature).

한 상황에서 최근 발생한 꿀벌의 집단 폐사와 대량 실종이 기온 변동성과 어떠한 관련성이 있는지를 꿀벌의 월

동 준비 및 산란시기에 대하여 기상학적으로 살펴본 결과는 다음과 같다. 1) 꿀벌 집단 폐사나 대량 실종에 대한 기

상학적 요인 분석을 위해서는 계절 평균보다는 일별 단위의 상세한 기온 분석을 바탕으로 수행하는 것이 도움이 되었다. 계절 전체에 대한 장기간 대상 분석은 그 안에서의 단기적인 기온의 증감을 확인하기 어려웠다. 2) 꿀벌의 생태와 관련하여 2021년 10월 겨울벌 생산시기와 겨울(12월) 월동봉구 형성시기에 대하여 기온의 변동성을 분석한 결과, 전남 지역의 경우(특히 영암군), 10월 10일까지 “이상고온” 현상을 겪다가 10월 17일에 기온이 급강하하는 “이상저온” 현상을 연이어 받아서, 극적인 기온 변화가 발생하였으며(Fig. 7), 이로 인해 월동을 위한 겨울벌 생산에 차질이 생겼을 가능성이 뚜렷이 확인되었다. 3) 2021년 11월~12월 초에 평균기온이 12°C 이상이 3일 이상 발생하여(Fig. 9), 월동봉구에서 산란이 시작되어 겨울벌 수명이 단축되었을 가능성도 확인되었다. 4) 2022년 1월과 2월에 이상고온/한파 현상은(Fig. 11) 꿀벌의 외출 및 미복귀로 인한 대량 실종 가능성을 제시해 주었다. 이상의 특징들은 다른 관련 지역들에서도 확인이 되었다(부록).

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 ‘자동 예찰 정보활용 주요 논 비래해충 발생 가능지 및 시기 분석 기술 개발 (PJ015620042022)’의 지원으로 수행되었습니다.

인용 문헌

기상청. 2021: 월간 기후분석정보, 10월호, 13pp.
 김한솔. 2022.03.31. 경향신문 ‘그 많던 꿀벌은 어디로 갔을까...2022년 꿀벌 실종 사건의 전말’.
 안혜민. 2022.03.27. SBS ‘[마부작침] 꿀벌 실종 사건이 나에게 미치는 영향은?’.
 이승용. 2022.04.04. MBC ‘전국 꿀벌 실종사태..과일값 폭등 식량위기로 이어지나’.
 Baker, M. 2020. Murder Hornets vs. Honeybees: A Swarm of Bees Can Cook Invaders Alive. The New York Times. 4.
 Becsi, B., H. Formayer and R. Brodschneider. 2021. A Biophysical Approach to Assess Weather impacts on Honey Bee Colony Winter Mortality. Royal Soc. Open Sci. 8(9): 210618.
 Bernd, H. 1979. Keeping a Cool Head: Honeybee Thermoregulation. Science 205(4412): 1269-1271.
 Eskov, E. K. and V. A. Toboev. 2011. Seasonal Dynamics of

Thermal Processes in Aggregations of Wintering Honey Bees (*Apis mellifera*, Hymenoptera, Apidae). Entomol. Rev. 91: 335-341.
 Flores, J. M., S. Gil-Lebrero, V. Gámiz, M. I. Rodríguez, M. A. Ortiz and F. J. Quiles. 2019. Effect of the climate change on honey bee colonies in a temperate Mediterranean zone assessed through remote hive weight monitoring system in conjunction with exhaustive colonies assessment. Sci. Total Environ. 653: 1111-1119.
 Ha, K. J., E. H. Ha, C. S. Yoo and E. H. Jeon. 2004. Temperature Trends and Extreme Climate since 1909 at Big Four Cities of Korea. Asia Pac. J. Atmos. Sci. 40: 1-16.
 Hosni, E. M., A. A. Al-Khalaf, M. G. Nasser, H. F. Abou-Shaara and M. H. Radwan. 2022. Modeling the Potential Global Distribution of Honeybee Pest, *Galleria mellonella* under Changing Climate. Insects 13(5): 484.
 Human, H., S. W. Nicolson and V. Dietsmann. 2006. Do honeybees, *Apis mellifera scutellata*, regulate humidity in their nest? Naturwissenschaften 93: 397-401.
 Jones, J. C. and B. P. Oldroyd. 2007. Nest Thermoregulation in Social Insects. Adv. In Insect Phys. 33: 153-191.
 Jung, C. 2015. Simulation study of Varroa population under the future climate conditions. J. Apic. 30: 349-358.
 KMA. 2020: Korean Climate Change Assessment Report 2020. ISBN 978-89-954715-8-6. 42pp.
 Lee, M. L., G. H. Byoun, M. Y. Lee, Y. S. Choi and H. K. Kim. 2015. The Effect of Temperature, Yellow Sand, and Acid Rain on Life Span and Nosema Infection Rate in Honeybees, *Apis mellifera* L. J. Apic. 30(4): 269-274.
 Lee, S.-J., J. Kang and H. Yoo. 2012. Atmospheric Modeling, Data Assimilation, and Predictability (Korean translation version). SigmaPress Ltd., 392pp.
 Lee, S.-J., J. Song and Y. Kim. 2016. The NCAM Land-Atmosphere Modeling Package (LAMP) Version 1: Implementation and Evaluation. Korean J. Agric. For. Meteorol. 18: 307-319.
 Mohammad, N. and C. Jung. 2021. Supercooling Points (SCPs) of Social Hymenopterans, *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) and *Vespa velutina* (Hymenoptera: Vespidae). J. Apic. 36: 71-76.
 Qin, M., H. Wang, Z. Liu, Y. Wang, W. Zhang and B. Xu. 2019. Changes in cold tolerance during the overwintering period in *Apis mellifera ligustica*. J. Apic. Res. 58: 702-709.
 Rahmstorf, S. and D. Coumou. 2011. Increase of extreme events in a warming world. Proc. Natl. Acad. Sci. 108(44): 17905-17909.
 Rosenkranz, P., P. Aumeier and B. Ziegelmann. 2010. Biology and control of Varroa destructor. J. Invertebr. Pathol. 103: S96-S119.
 Seely, T. D. and P. K. Visscher. 1985. Survival of honeybees in cold climates: The critical timing of colony growth and reproduction. Ecol. Entomol. 10: 81-88.
 Southwick, E. E. and G. Heldmaier. 1987. Temperature Control

- in Honey Bee Colonies. *BioScience* 37: 395-399. DOI: 10.2307/1310562.
- Southwick, E. E. and J. N. Mugaas. 1971. A hypothetical homeotherm: the honey bee hive. *Comp. Biochem. Physiol.* 40A: 935-944.
- Southwick, E. E. and R. F. A. Moritz. 1987. Social control of air ventilation in colonies of honey bees, *Apis mellifera*. *J. Insect Physiol.* 33: 623-626. DOI: 10.1016/0022-1910(87)90130-2.
- Stabentheiner, A., H. Kovac and R. Brodschneider. 2010. Honeybee colony thermoregulation-regulatory mechanisms and contribution of individuals in dependence on age, location and thermal stress. *PLoS ONE* 5: 1-13.
- Steinhauer, N. A., K. Rennich, M. E. Wilson, D. M. Caron, E. J. Lengerich, J. S. Pettis and Bee Informed Partnership. 2014. A national survey of managed honey bee 2012-2013 annual colony losses in the USA: results from the Bee Informed Partnership. *J. Apic. Res.* 53(1): 1-18.
- Switanek, M., K. Crailsheim, H. Truhetz and R. Brodschneider. 2017. Modelling seasonal effects of temperature and precipitation on honey bee winter mortality in a temperate climate. *Sci. Total Environ.* 579: 1581-1587.
- Van Esch, L., J. L. De Kok, L. Janssen, B. Buelens, L. De Smet, D. C. de Graaf and G. Engelen. 2020. Multivariate landscape analysis of honey bee winter mortality in Wallonia, Belgium. *Environ. Model. Assess.* 25(3): 441-452.
- Watanabe, M. E. 2008. Colony collapse disorder: many suspects, no smoking gun. *Bioscience* 58(5): 384-388.
- Winston, M. L. 1987. *The biology of the honey bee*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Yi, H. B. and C. Jung. 2010. Colony Temperature Regulation by the European Honeybee (*Apis mellifera* L.) in Late Summer in Temperate Region. *Kor. J. Apic.* 25: 1-7.

부 록

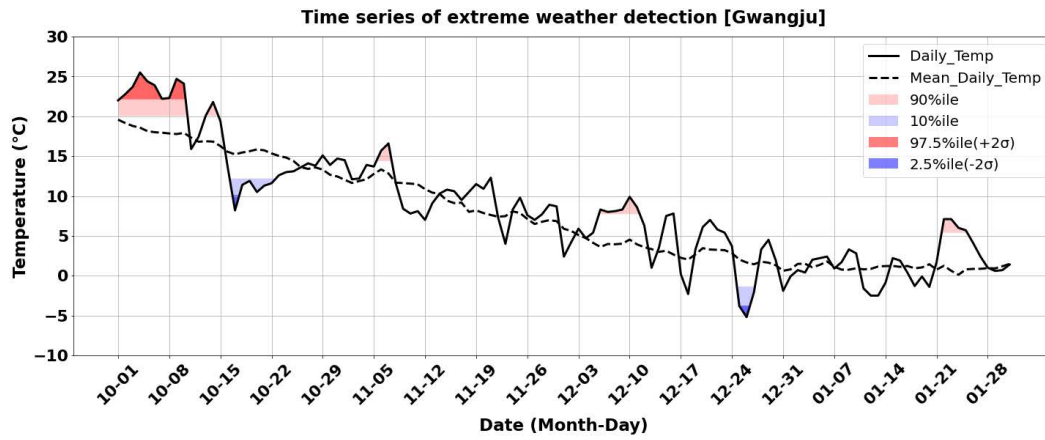


Fig. S1. The time series of abnormal temperature detection in Gwangju area using data from October 2021 to January 2022 (Black line: Daily average temperature, Black dashed: Average of daily average temperature, Red dashed: $+2\sigma$ position of the average monthly temperature, Blue dashed: -2σ position of the average monthly temperature, Pale blue shade: Semi-abnormally low temperature, Blue shade: Abnormally low temperature, Pale red shade: Semi-abnormally high temperature, Red shade: Abnormally high temperature).

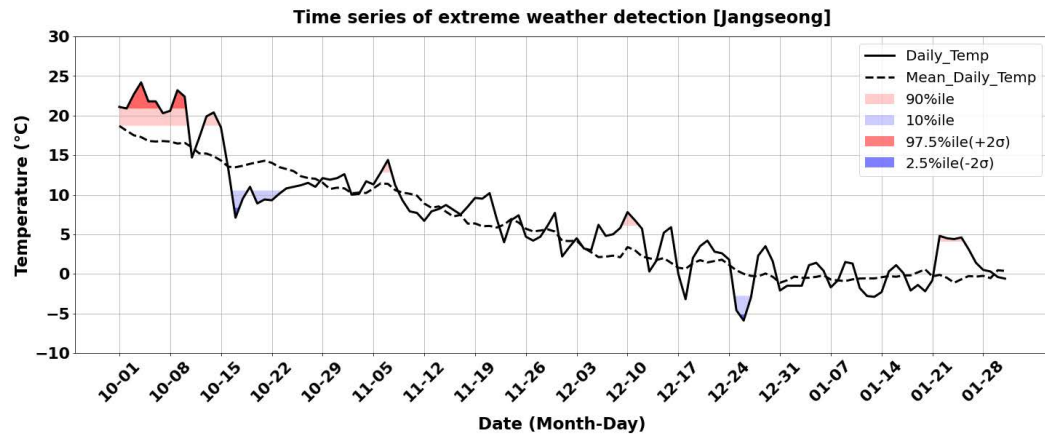


Fig. S2. Same as Fig. S1, but for Jangseong.

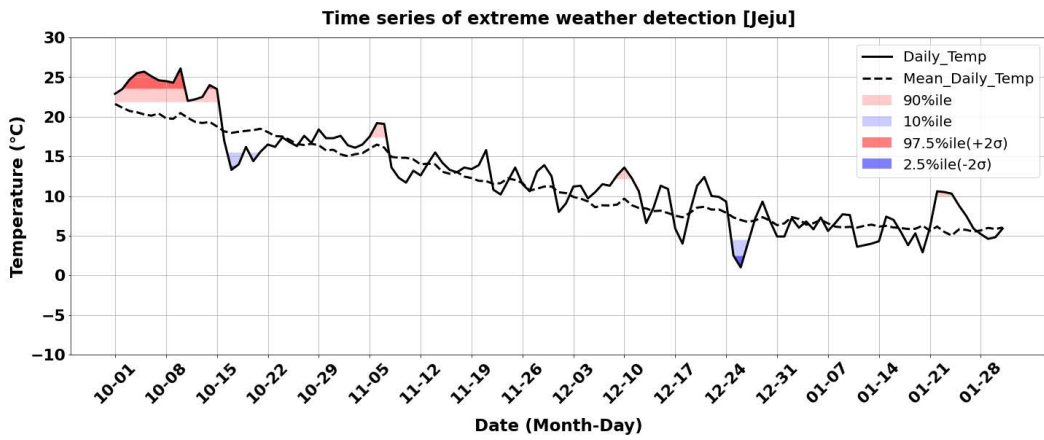


Fig. S3. Same as Fig. S1, but for Jeju.

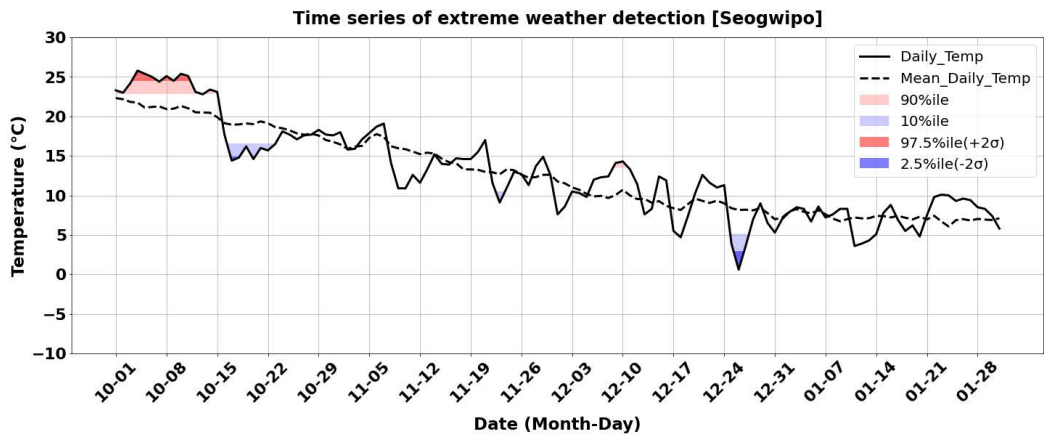


Fig. S4. Same as Fig. S1, but for Seogwipo.