

기후변화에 따른 지역 및 축종별 가축더위지수
변화 조사김현상¹ · 성필남² · 이성신¹ · 위지수¹ · 이유경¹ · 김혜란¹ · 이성대^{1*}¹농촌진흥청 국립축산과학원 동물영양생리과, ²농촌진흥청 국립축산과학원 축산물이용과Investigation of changes in temperature-
humidity index by region and livestock
due to climate changeHyun Sang Kim¹, Pilnam Seong², Seongshin Lee¹, Jisoo Wi¹,
Yookyung Lee¹, Hye Ran Kim¹, Sung Dae Lee^{1*}¹Animal Nutrition and Physiology Division, National Institute of Animal Science, Rural
Development Administration, Wanju 55365, Korea²Animal Products Research and Development Division, National Institute of Animal Science,
Rural Development Administration, Wanju 55365, KoreaReceived: Apr 14, 2024
Revised: Apr 25, 2024
Accepted: May 15, 2024

*Corresponding author

Sung Dae Lee
Animal Nutrition and Physiology
Division, National Institute of
Animal Science, Rural Development
Administration, Wanju 55365, Korea
Tel: +82-63-238-7452
E-mail: leesd@korea.krCopyright © 2024 Korean Society of
Animal Science and Technology.
This is an Open Access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution
Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>)
which permits unrestricted
non-commercial use, distribution,
and reproduction in any medium,
provided the original work is properly
cited.

ORCID

Hyun Sang Kim
<https://orcid.org/0000-0002-3422-1990>
Pilnam Seong
<https://orcid.org/0000-0003-2915-1059>
Seongshin Lee
<https://orcid.org/0000-0002-4872-3705>
Jisoo Wi
<https://orcid.org/0000-0001-9437-6233>
Yookyung Lee
<https://orcid.org/0000-0002-9896-4152>
Hye Ran Kim
<https://orcid.org/0000-0003-2207-3668>
Sung Dae Lee
<https://orcid.org/0000-0002-9167-4099>

Abstract

Climate change induced by global warming is expected to increase heat stress in livestock during summer months, negatively impacting the economic viability of livestock farming. This study used weather data collected from 160 districts during the summers of 2016 to 2022 to create distribution maps over time and analyze changes. Excluding mountainous regions like the Taebaek Mountains and parts of Jirisan, the temperature-humidity index (THI) was found to be above 70–80, indicating high heat stress levels. Livestock experiences adverse effects like decreased feed intake and weight loss, with the proportion of days exceeding critical heat stress thresholds for cattle (79), and pigs and poultry (74), being 60% and over 80%, respectively. Mitigation strategies such as improving livestock breeds, dietary adjustments, environmental management, and facility upgrades are necessary. Additionally, forecasting THI changes and preparing accordingly are essential for adapting to climate change impacts on livestock.

Keywords: Heat stress, Temperature-humidity index, Livestock, Summer season

서론

대기 중 온실가스 농도 증가로 기후변화 심화 및 이상기후 발생이 전 세계적으로 광범위하게 나타나고 있다. 지난 100년간(1911–2010) 세계 평균 기온이 0.75℃ 상승한 반면, 한반도 평균 기온은 1.8℃ 상승하여 세계 평균보다 두 배 이상 증가한 것으로 보고되었다[1]. 평균 기온 상승과 함께 폭염일수 및 열대야일수 역시 증가하고 있다. 폭염일수는 2014년 7.4일에서 2018년 31.5일로 약 4배가량 증가하였으며, 열대야일수는 3.3일에서 7.7일로 약 2배가량 증가하였다[2].

Competing interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Funding sources

This study was carried out with support from the Rural Development Administration of Korea (Project title: Studies for actual condition survey and vulnerability assessment of livestock under climate change; Project number: RS-2020-RD008671).

Acknowledgements

Not applicable.

Availability of data and material

Upon reasonable request, the datasets of this study can be available from the corresponding author.

Authors' contributions

Conceptualization: Seong P.
Data curation: Seong P, Wi J.
Formal analysis: Kim HS.
Methodology: Lee SD.
Software: Kim HS.
Validation: Lee SD.
Investigation: Lee Y.
Writing - original draft: Kim HS.
Writing - review & editing: Kim HS, Seong P, Lee S, Wi J, Lee Y, Kim HR, Lee SD.

Ethics approval and consent to participate

This article does not require IRB/ IACUC approval because there are no human and animal participants.

세계기상기구(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가보고서의 기후변화 新시나리오(RCP 8.5)에 따르면 2050년 한반도 평균 기온은 3.4℃ 상승하고, 폭염일수는 3배(8.8 일→26.4일), 열대야일수는 6배(5일→30일) 증가할 것으로 예측되고 있다[3].

기후변화로 인한 환경 변화는 축산업에도 막대한 영향을 미친다. 특히, 여름철 폭염으로 인한 열스트레스는 가축의 생산성 저하를 초래할 수 있다. 축종에 따라 더위에 대한 생리대사와 사육 환경에도 차이가 있어 열스트레스에 대한 민감도가 상이하다. 돼지와 가금이 가장 취약한 반면, 한우와 젓소의 경우 덜 민감지만 생산성 저하에 대한 보고가 발표되고 있다[4-6]. 한우의 경우 육질 1등급 출현율 감소, 젓소는 유량 감소, 돼지는 증체량 감소, 닭은 산란율 감소 등이 보고되었으며, 심각한 경우 폐사를 유발하여 경제적 피해를 야기할 수 있다[7].

따라서 기온 상승 등 기후변화 상황에서 안정적인 가축 생산을 위해 온도와 습도 같은 환경 조건을 분석하여 가축더위지수(THI, temperature-humidity index)를 평가하고 이에 대응할 필요가 있다. 가축더위지수는 환경 요인에 대한 평가지표로 사용되며, 가축이 느끼는 환경 스트레스 수준을 평가하는 데 활용되고 있다[8]. 지역별로 매년 측정된 수치가 다르지만, 특정 지역에서는 집약적으로 피해를 입는 경우가 조사되고 있다.

따라서 본 연구에서는 가축의 고온 스트레스 발생 예측 분석을 위해 2016년부터 2022년까지 국내 시군구별 기상요소(기온, 상대습도)를 수집하여 가축더위지수를 계산하여 가축스트레스 지수를 산출하고 분포도를 작성하고자 하였다.

재료 및 방법

기상관측자료 수집 및 가축스트레스지수 산출

기상관측자료는 기상청 종관측자료를 통해 수집하였으며 기상요소로는 일 최고 기온과 평균 상대습도를 수집하고 자료화하였다. 시간범위는 2016년부터 2022년까지 7년간이며 공간범위는 한반도 군사분계선 이남 지역(북위 33.0, 동경 124.0-북위 39.0, 동경 132.0)이며 광역시 및 특별 자치시 포함한 시군구로 167개 지역을 조사하였다. 수집된 기상관측자료를 Dikmen 등이 제시한 가축더위지수(THI) 산출식을 이용하였으며, 식은 다음과 같다[9].

$$\text{가축더위지수(THI)} = (1.88 \times T + 32) - [(0.55 - 0.0055 \times \text{RH}) \times (1.8 \times T - 26)]$$

T는 일 최고 온도이며, RH는 상대습도이다.

자료 분석

자료분석기간은 2016-2022년 수집한 기상관측자료 중에서 통상적으로 하절기로 구분되고 고온 환경에 노출되는 6-8월까지 자료를 활용하였다. 가축더위지수 단계는 Armstrong(1994), Whitter(1993) 및 Dikmen와 Hansen(2009)의 연구 결과를 기초로[10-12], 5단계(양호, 주의, 경고, 위기(danger), 위급(extreme danger)으로, 각 단계별 지수 범위와 가축 상태는 Tables 1과 2에 나타내었다.

가축스트레스지수 분포도 작성

가축더위지수 분포도 작성을 위하여 공간해상도는 1 km × 1 km의 격자 기상 추정 방법을 이용하여 거리제곱역산가중[13] 및 고도 보정[14]을 통해 1 km 해상도의 일별 격자 기온자료를

Table 1. The stages and range of the temperature–humidity index

Livestock	Safe	Caution	Danger	Emergency	Dead
Hanwoo/dairy cow	72 ↓	72–78	79–89	90–99	99 ↑
Pig	64 ↓	64–73	74–83	84–94	94 ↑
Poultry	63 ↓	63–73	74–80	81–92	92 ↑

Table 2. Stages of livestock condition based on the livestock condition

Stage	The stage of livestock condition
Dead	Mortality occurrence
Emergency	- Intake of over 20% of feed and severe weight loss - Increased respiratory rate and body temperature leading to hormonal changes within the body
Danger	Feed intake and weight loss, respiratory rate and body temperature increase
Caution	Mild stress
Safe	The optimal environment for livestock rearing

구하였으며, 상대습도(공간해상도 10 km)의 경우 공간내삽방법을 이용한 보간 추정으로 1 km 해상도로 조정하였다. 가축더위지수 분포도는 지역별 일 단위로 계산하고, 이를 월 단위로 통계하여 조사기간 동안 월별 분포도 작성에 이용하였으며, 각 축종별(한우/젓소, 돼지, 가금) 가축더위지수 단계에 따라 축종별 분포도를 작성하였다.

가축더위지수 및 경고 단계 초과일수 비율 등에 대한 분포도는 QGIS software 3.34(QGIS, London, UK)를 이용하여 작성하였다. 행정구역은 시군단위로 표현하였으며, 누락된 데이터 값이나 잘못 적용된 부분은 상호 검수(null 값 검수)하였다.

결과 및 고찰

연간 온습도지수의 변화 분석

일최고 가축더위지수 변화를 조사한 결과는 Fig. 1에 제시하였다. 조사기간 2016–2022년 평

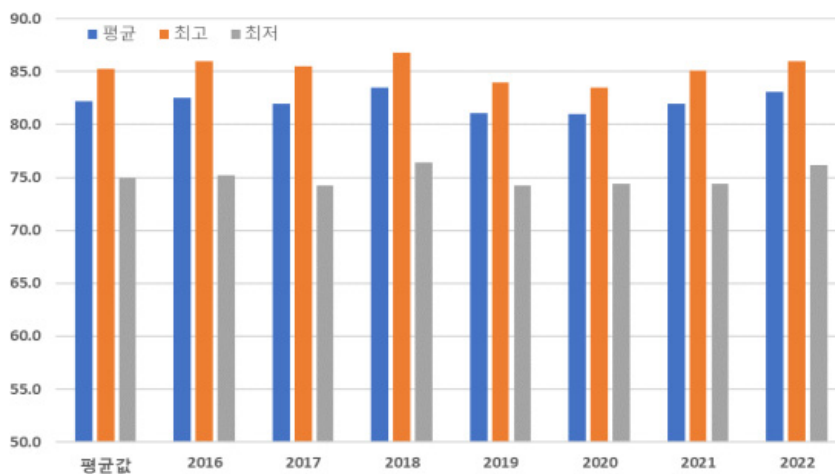


Fig. 1. Annual trend of temperature–humidity index variation.

균 일 최고 가축스트레스지수는 82.2로 나타났으며, 최소 및 최대값은 각각 75.0과 85.3로 확인되었다. 연도별로는 2018년이 83.5(76.4-86.8)로 가장 높았으며, 2019년과 2020년은 81.1(74.2-84.0)과 81.0(74.4-83.5)으로 다소 낮아졌다가, 2021년부터 다시 상승하는 추세가 확인되었다 (Table 3).

연간 온습도지수의 지역별 변화 분석

연도 및 월별 일 최고 가축더위지수 및 분포도는 Table 4 및 Fig. 2에 제시하였다. 시군구 단위 가축더위지수는 75.0-85.3으로 나타나 모든 시군구가 돼지·가금에서 사료섭취량 및 체중 감소, 호흡량과 체온이 증가하는 경고 단계 수준인 것으로 나타났다. 특히 전북의 익산, 전주, 김제, 정읍, 군산과 광주광역시와 전남의 나주, 담양, 충남의 논산, 경북의 구미, 경남의 창원 지역이 가축더위지수 84.0-85.0으로, 돼지와 가금의 위험 단계 수준에 달해 고위험지역으로 나타났다. 반면, 강원도의 태백, 울릉, 평창, 인제, 속초, 정선, 양양, 삼척, 강릉, 동해, 고성, 봉화는 가축더위지수 74.9-78.7로, 한우·젖소에서는 약간의 스트레스만 받는 주의 단계 수준으로 저위험지역으로 나타났다. 월별 가축스트레스지수에 있어서는 연도별 차이는 있었으나, 평균적으로 6월은 대부분 시군에서 가축더위지수가 70 이상으로 조사되었고, 보령, 제주, 통영, 강화, 서귀포, 울진, 속초, 신안, 양양, 완도, 태안 11개 지역은 79를 나타내었다. 진도, 동해, 태백은 78, 울진과 울릉은 77로 가장 낮은 지수를 나타내었다. 7월은 안성에서 가축더위지수가 84로 가장 높았고, 그 외 지역은 83 이하를 보였다. 8월은 모든 지역에서 가축더위지수가 80 이상으로 조사되었고,

Table 3. Annual daily maximum temperature-humidity index (average from June and August)

	Year							Mean
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Mean	82.5	82.0	83.5	81.1	81.0	81.1	81.0	82.2
Max	86.0	85.5	86.8	84.0	83.5	84.0	83.5	85.3
Min	75.2	74.2	76.4	74.2	74.4	74.2	74.4	75.0
SD	1.81	2.05	1.83	1.72	1.74	1.78	1.73	1.80

Table 4. List of top municipalities with a temperature-humidity index above daily maximum of 84

Municipalities	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Mean
Iksan-si	86.0	85.0	86.7	83.8	83.5	84.2	84.5	85.0
Gwangju	85.3	85.5	86.8	83.6	83.4	84.3	84.4	84.9
Naju-si	85.2	85.3	86.7	83.6	83.3	83.8	84.3	84.8
Jeonju-si	85.5	84.3	86.5	84.0	83.4	85.0	85.4	84.7
Gimje-si	84.9	84.1	85.9	83.5	83.3	85.5	85.8	84.4
Gumi-si	84.5	84.2	85.3	83.7	83.2	85.3	85.7	84.2
Damyang-gun	84.1	84.3	85.8	83.2	83.0	84.3	85.0	84.1
Nonsan-si	84.6	83.8	85.6	83.2	82.9	84.1	84.9	84.1
Jeongeup-si	84.5	84.1	85.8	83.0	82.6	84.2	84.6	84.0
Gunsan-si	84.9	84.0	85.6	82.7	82.7	84.3	84.7	84.0
Changnyeong-gun	84.2	84.7	85.0	82.7	83.2	83.7	84.2	84.0

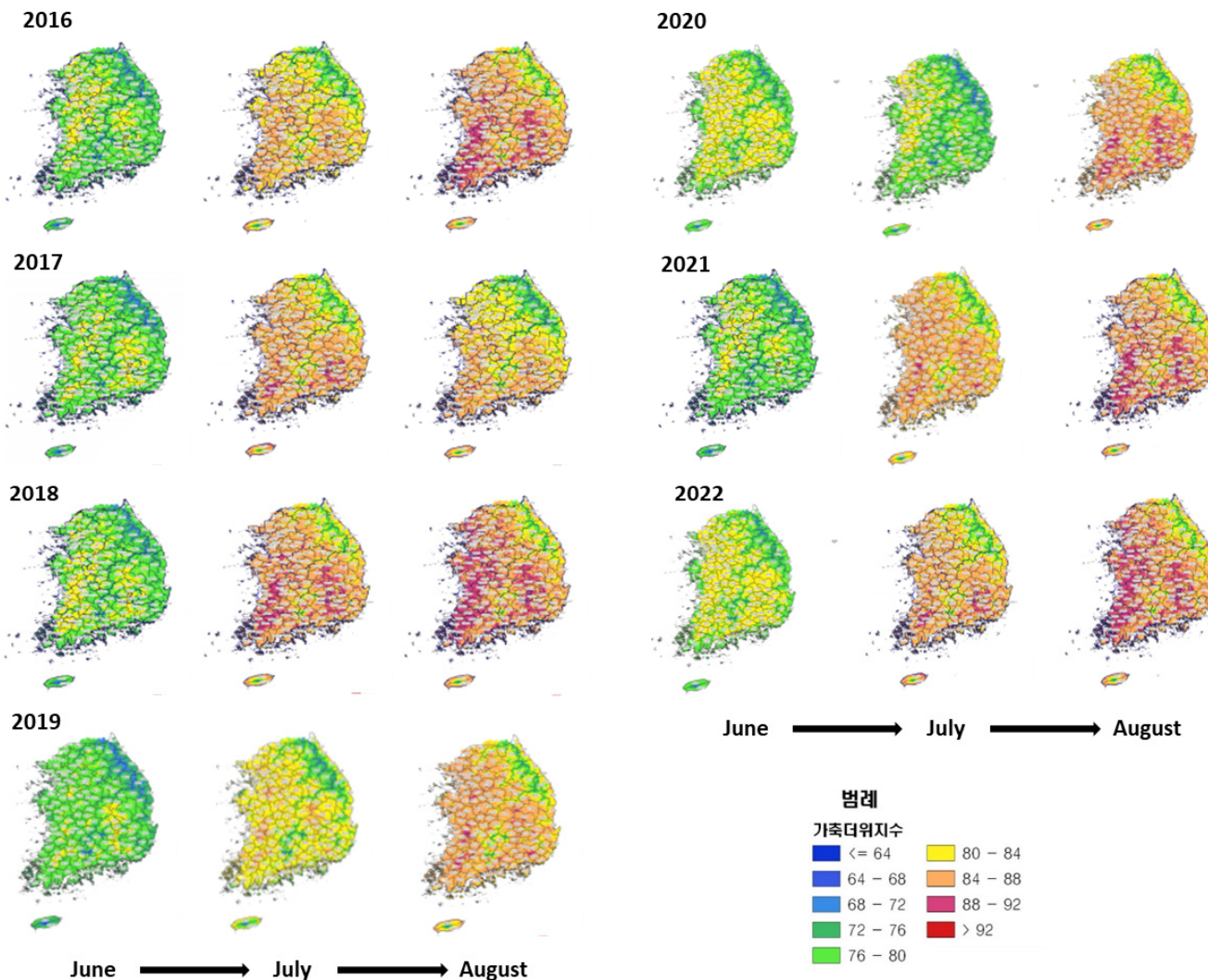


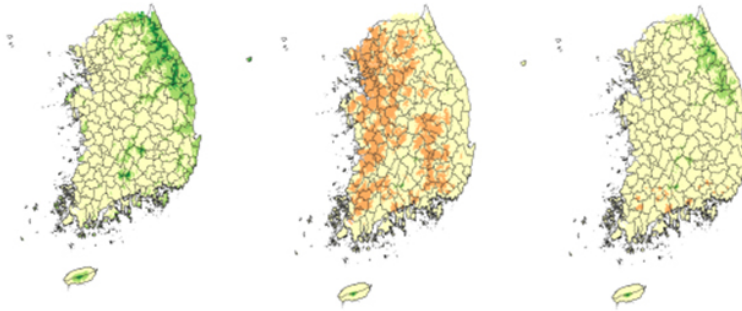
Fig. 2. The distribution of annual summer season temperature-humidity index (THI).

김천, 창녕, 창원, 광양, 장성, 함안, 담양, 나주, 광주(경기), 고흥, 익산은 더위지수 90 이상을 나타내었다.

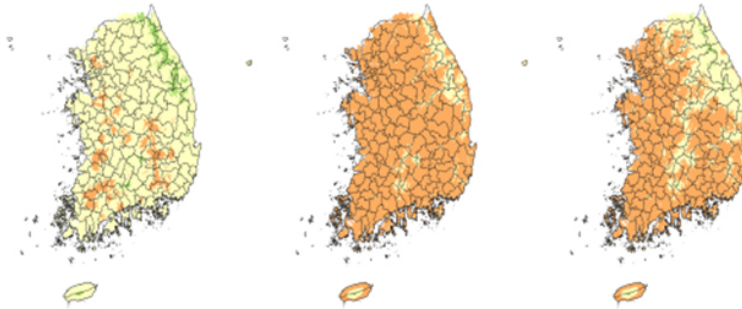
월별 온습도지수의 축종별 변화 분석

월별 온습도지수에 따른 축종별 변화는 Fig. 3에 나타내었다. 6월 기준 축종별 가축더위지수 단계 기준으로 한우, 젓소는 위험 이상의 수준을 나타낸 지역은 없었지만, 돼지는 거창, 안성 등 22개 지역에서 위험 단계를 보였다. 가금은 29개 지역을 제외한 모든 지역에서 위험 단계를 나타내었다. 7월 기준 축종별 가축더위지수 단계 기준으로 한우, 젓소는 대부분 지역에서 경고 단계 수준을 나타내었고, 태백, 울릉, 동해, 울진, 속초 등 태백산맥 및 동해안 지역의 18개 시군에서는 주의 단계로 나타났다. 돼지는 안성에서만 위험 단계를 보였고, 그 외 지역은 경고 단계로 나타났다. 가금은 78개 지역에서 위험 단계를 보였다. 8월 기준, 90 이상인 지역에서 한우·젓소 위험 단계를 보였으며, 돼지는 양구와 태백을 제외한 모든 지역에서 위험 단계를 나타내었다. 가금은 모든 지역에서 위험 단계를 보였다.

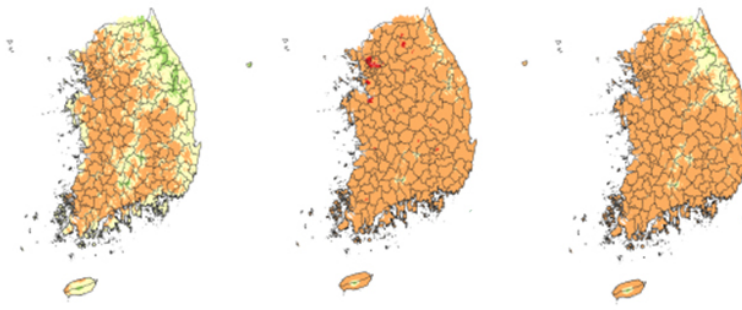
한우/젖소



돼지



가금



June → July → August



Fig. 3. The distribution of summer season temperature-humidity index (THI) from livestock species.

지역 및 축종별 온습도지수 경고·위험단계 초과일수 분석

연도별 가축더위지수 경고 단계 초과일 수 및 축종별 경고 및 위험 단계 초과일수는 Table 5와 Fig. 4에 제시하였다. 가축더위지수 경고 단계 초과일수 비율은 한우·젖소 64.3%(24.3%~81.0%), 돼지·가금 83.9%(54.6%~90.7%)이었으며, 연도별 가축더위지수 경고 단계 초과일수 비율은 가축더위지수 변화 양상과 유사하게 2018년을 정점으로 가장 높았다가 2019~2020년은 다소 낮아졌다가 2021년부터 다시 상승하는 추세로 나타났다.

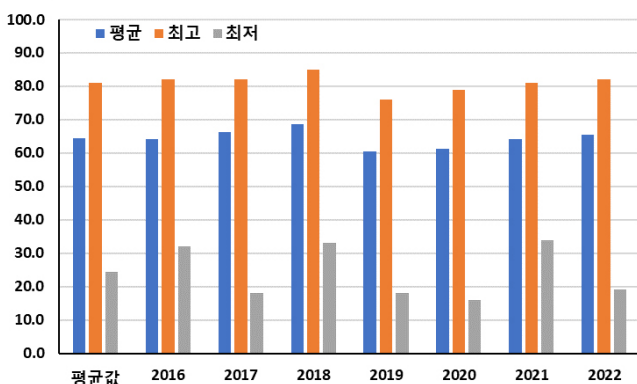
시군구별 가축더위지수 경고 단계 초과일수 비율은 가축더위지수와 동일한 경향을 보여 익산, 광주, 나주, 전주, 김제, 구미, 담양, 논산, 정읍, 군산, 창녕이 81.0%~90.7%로 조사기간의 대부분이 경고 단계를 초과하였으며, 태백, 울릉, 평창, 인제, 속초, 정선, 양양, 삼척, 강릉, 동해, 고성(강원), 봉화는 가축더위지수 24.3~54.6으로 저위험지역으로 나타났다.

시군구별 2016~2022년도 고온기(6~8월) 축종별 가축더위지수 경고·위험 단계 초과일수 평

Table 5. Exceedance day ratio of summer season warning stages for livestock

		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Mean
Hanwoo/ dairy cow (79)	Mean	64.1	66.4	68.6	60.6	61.2	64.1	65.4	64.3
	Max	82.0	82.0	85.0	76.0	79.0	81.0	82.0	81.0
	Min	32.0	18.0	33.0	18.0	16.0	34.0	19.0	24.3
	SD	8.7	11.4	8.6	11.6	12.2	8.8	11.3	10.4
Pig/poultry (84)	Mean	84.6	84.5	85.1	82.9	81.6	84.3	84.6	83.9
	Max	91.0	90.0	92.0	92.0	89.0	90.0	91.0	90.7
	Min	56.0	50.0	59.0	53.0	58.0	50.0	56.0	54.6
	SD	6.5	6.1	5.9	6.8	6.2	6.1	6.5	6.3

한우/젖소



돼지/가금

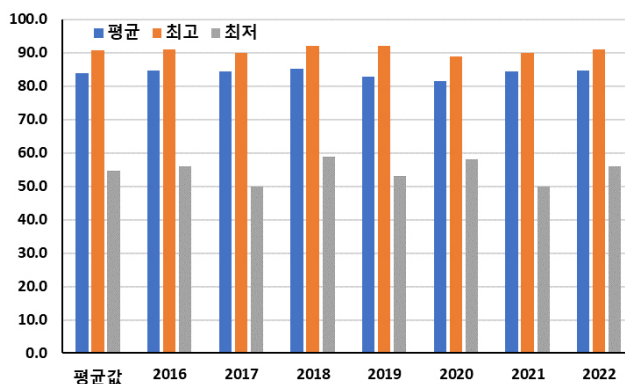


Fig. 4. Trend in annual exceedance day ratio of summer season warning stages for livestock.

균을 분석하여 Figs. 5-7에 제시하였다. 한우·젖소는 가축더위지수 경고 단계(THI 79 이상) 초과일수는 월별 차이는 있으나, 대부분의 시군구에서 15-20일 정도 초과한 것으로 나타났다. 위험단계(THI 90 이상)는 6월에는 초과한 날이 없었으며, 7-8월에 대부분의 시군구에서 5일 내외 초과한 것으로 나타났다. 돼지는 경고단계(THI 74 이상)는 대부분의 시군구에서 25일 정도 초과하였으며, 위험 단계(THI 84 이상)는 7-8월에 강원도를 제외하고 20-25일 정도 초과하였다. 가금은 강원도를 제외하고 경고 단계(THI 74 이상) 및 위험 단계(THI 81 이상) 역시 20-25일 이상 초과한 것으로 나타났다. 고온기(6-8월) 가축더위지수 경고·위험 단계 초과일수가 많은 상위 시군구는 익산, 전주, 광주, 나주, 김제, 평택, 정읍, 논산, 세종, 구미, 안성, 아산, 천안, 부여, 함평 등으로 나타났다.

결론

지구온난화로 인한 기후변화는 여름철 고온 스트레스를 유발하여 축산업의 경제성에 지속적으로 부정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이러한 기후변화에 노출된 가축들의 환경 변화에 대한 위험도는 가축더위지수(THI)를 계산함으로써 평가하고 예측할 수 있다. 본 연구에서는 2016년부터 2022년까지 6월에서 8월 사이에 160개 시군구에서 수집된 기상관측자료(기온, 상대습도 등)를 활용하여 시간 흐름에 따른 가축더위지수의 분포도를 작성하고, 그 변화를 분석하였

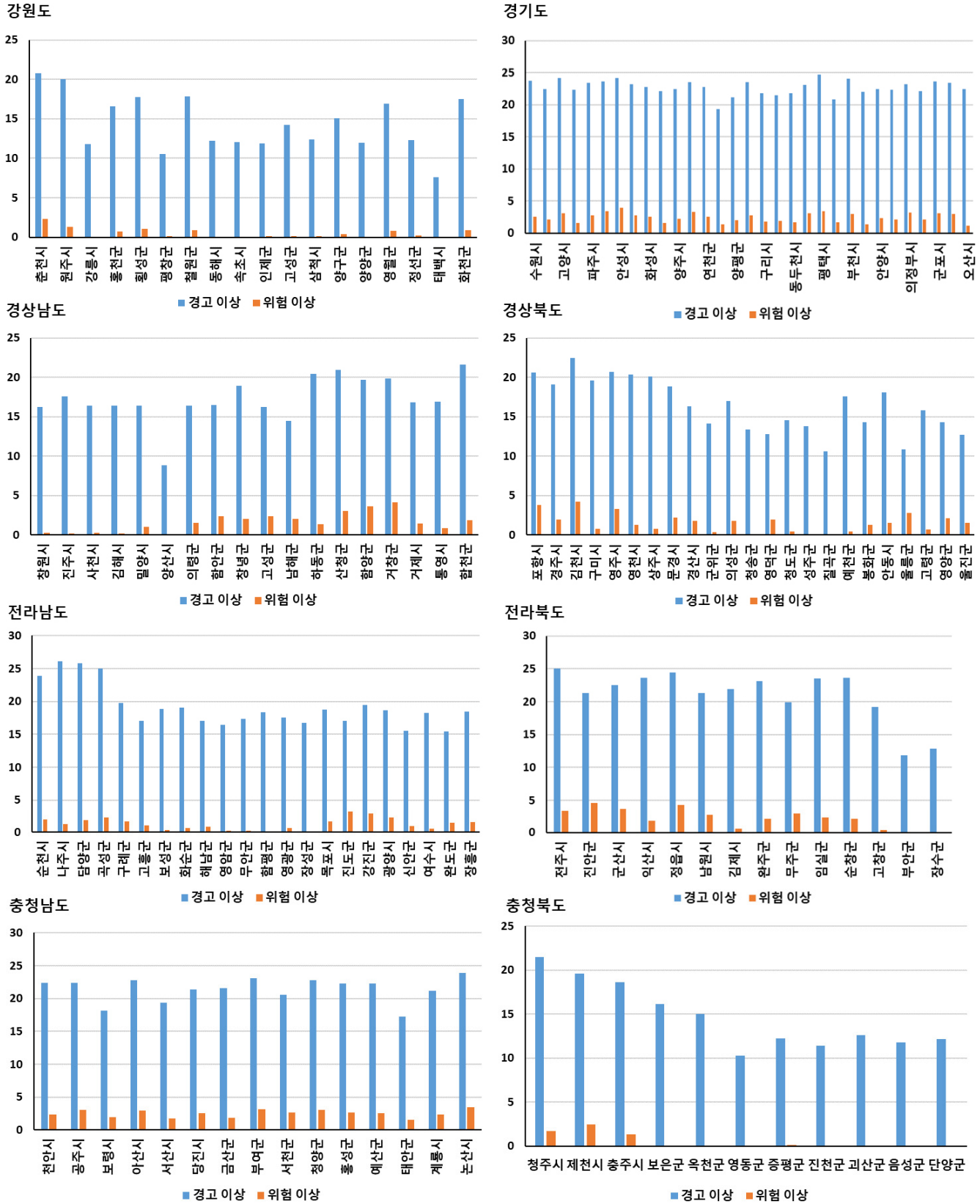


Fig. 5. Exceedance day ratio of summer season warning and danger stages for Hanwoo and dairy cow.

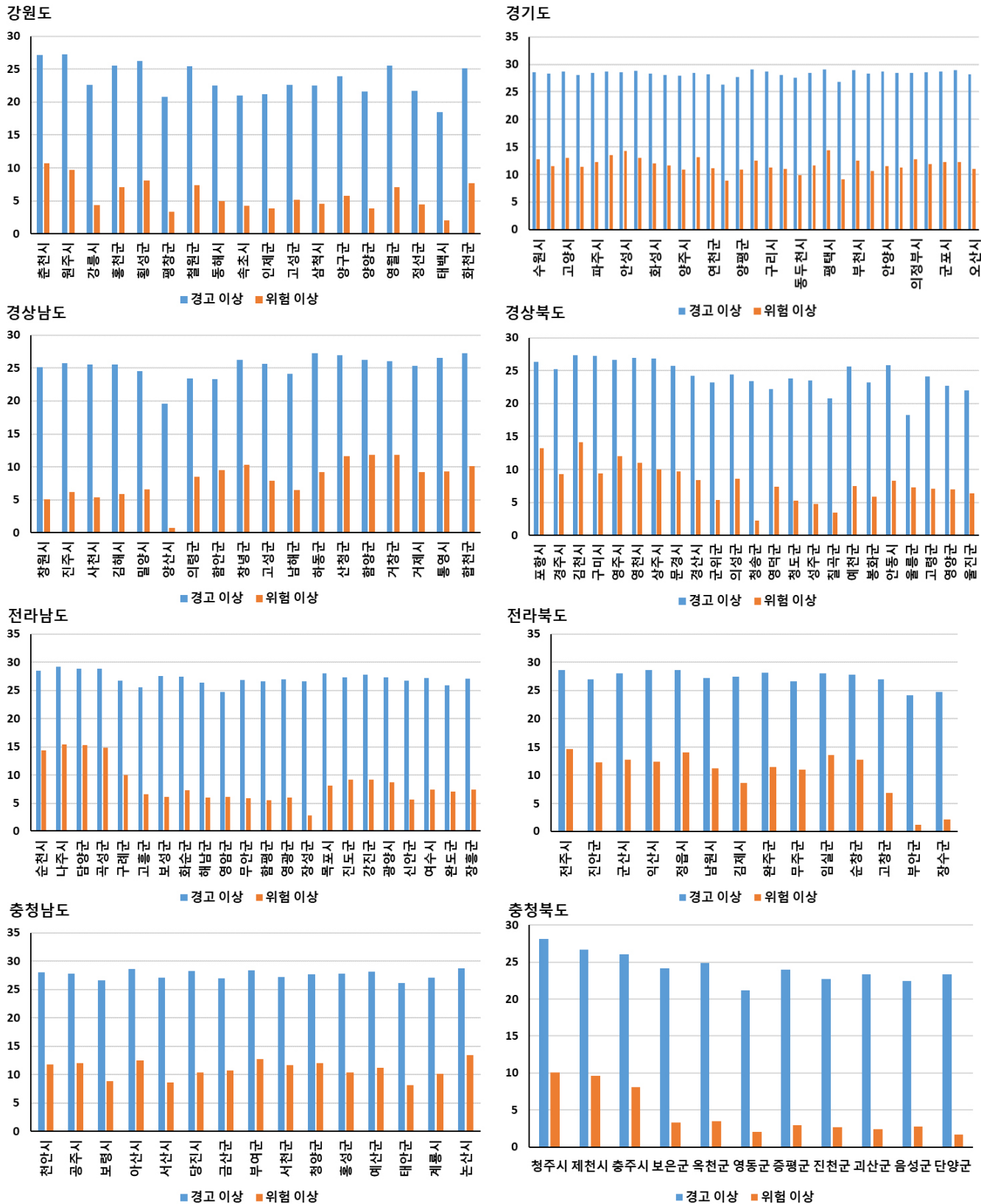


Fig. 6. Exceedance day ratio of summer season warning and danger stages for pig.

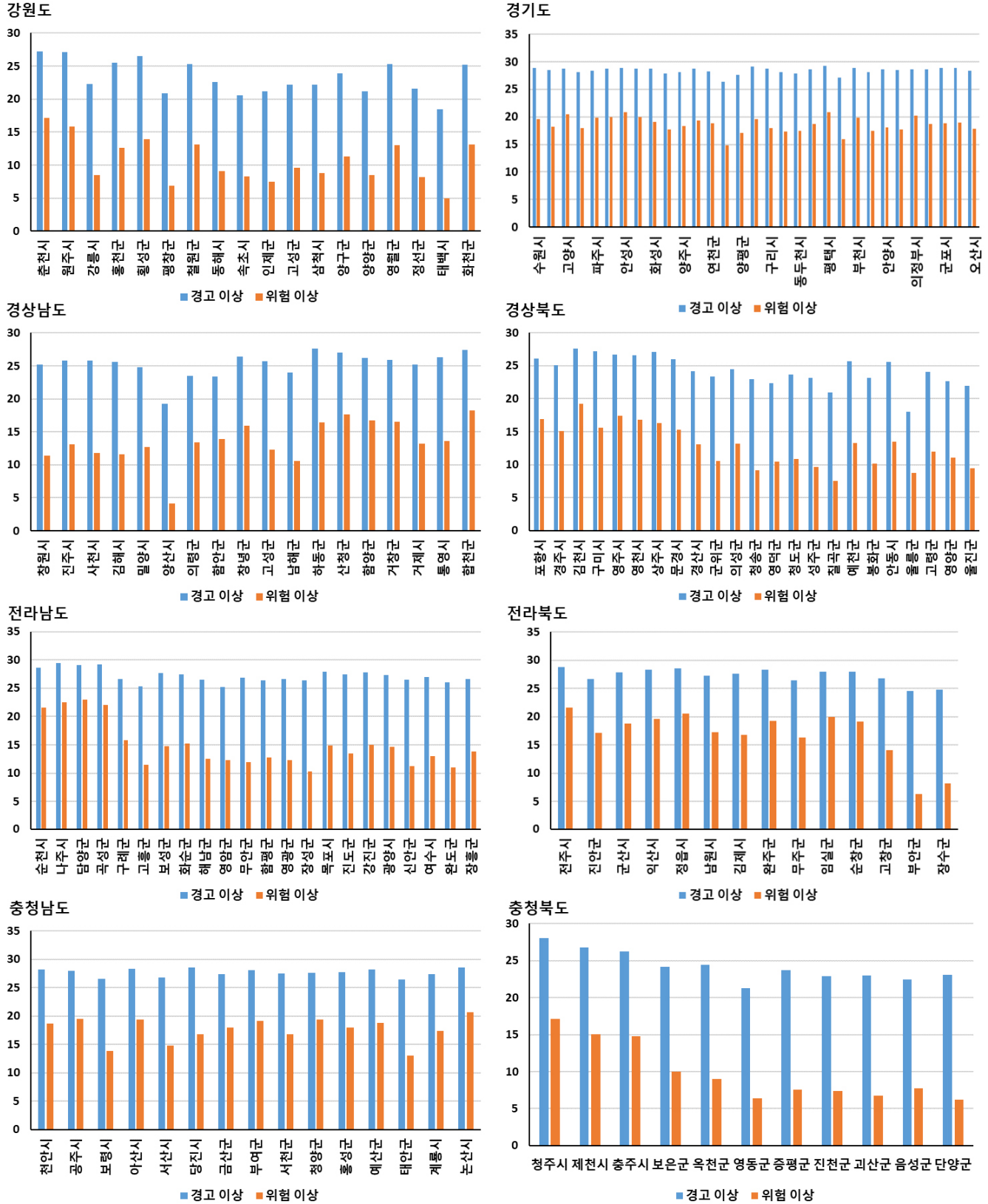


Fig. 7. Exceedance day ratio of summer season warning and danger stages for poultry.

다. 분석 결과, 태백산맥과 지리산 일부 산간지역을 제외한 대부분의 지역에서 가축더위지수가 70-80 이상인 것으로 나타났다. 가축의 사료 섭취량 감소와 체중 감소 등 부정적 영향을 초래하는 경고 단계(한우: 79 이상, 돼지 및 가금류: 74 이상)를 초과하는 일수 비율은 한우의 경우 60%, 돼지 및 가금류는 80% 이상으로 나타났다. 따라서, 앞으로의 기후변화에 따른 가축더위지수의 변화를 예측하고 이에 대응하기 위해 가축 개량, 사양 조절, 환경 관리, 시설 보완 등의 대비책 마련이 필수적으로 사료된다.

REFERENCES

1. Park BJ, Kim YH, Min SK, Kim MK, Choi Y, Boo KO, et al. Long-term warming trends in Korea and contribution of urbanization: an updated assessment. *J Geophys Res Atmos*. 2017;122:10.637-54. <https://doi.org/10.1002/2017JD027167>
2. Korea Meteorological Administration [KMA]. 2018 abnormal climate report. Korea Meteorological Administration; 2018.
3. Stocker T. Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; 2014.
4. Atrian P, Shahryar HA. Heat stress in dairy cows (a review). *Res Zool*. 2012;2:31-7.
5. Ross JW, Hale BJ, Gabler NK, Rhoads RP, Keating AF, Baumgard LH. Physiological consequences of heat stress in pigs. *Anim Prod Sci*. 2015;55:1381-90. <https://doi.org/10.1071/AN15267>
6. Lara LJ, Rostagno MH. Impact of heat stress on poultry production. *Animals*. 2013;3:356-69. <https://doi.org/10.3390/ani3020356>
7. Gonzalez-Rivas PA, Chauhan SS, Ha M, Fegan N, Dunshea FR, Warner RD. Effects of heat stress on animal physiology, metabolism, and meat quality: a review. *Meat Sci*. 2020;162:108025. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108025>
8. National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. Livestock hot weather stress. Operations Manual Letter C-31-76. Kansas City, MO: US Department of Commerce; 1976.
9. Dikmen S, Alava E, Pontes E, Fear JM, Dikmen BY, Olson TA, et al. Differences in thermoregulatory ability between slick-haired and wild-type lactating Holstein cows in response to acute heat stress. *J Dairy Sci*. 2008;91:3395-402. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1072>
10. Armstrong DV. Heat stress interaction with shade and cooling. *J Dairy Sci*. 1994;77:2044-50. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77149-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77149-6)
11. Whittier JC. Hot weather livestock stress. Columbia, MO: University of Missouri; 1993.
12. Dikmen S, Hansen PJ. Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment? *J Dairy Sci*. 2009;92:109-16. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1370>
13. Ashraf M, Loftis JC, Hubbard KG. Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks. *Agric For Meteorol*. 1997;84:255-71. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(96\)02358-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(96)02358-1)
14. Yun JI, Yi DS, Choi JY, Cho SI, Park EW, Hwang H. Elevation-corrected spatial interpolation for near-real time generation of meteorological surfaces from point observations. *AgroInformatics*. 1999;1:28-33.