



하절기 자돈 고온 스트레스 평가를 위한 THI 지수 모의

Estimation of THI Index to Evaluate Thermal Stress of Piglets in Summer Season

하태환* · 권경석**·† · 이인복* · 김락우* · 여육현* · 이상연* · 최희철** · 김종복** · 이준엽** · 전중환** · 우샘이** · 양가영**

Ha, Taehwan · Kwon, Kyeong-seok · Lee, In-bok · Kim, Rak-woo · Yeo, Uk-hyeon · Lee, Sangyeon · Choi, Hee-chul · Kim, Jong-bok · Lee, Jun-yeob · Jeon, Jung-hwan · Woo, Saemee · Yang, Ka-young

Abstract

Thermal stress of pigs causes decreased feed consumption and weight gain rate, immunosuppression, reproductive disorders, and increased mortality. The concept of the temperature-humidity index (THI) has been widely used to evaluate the degree of thermal stress of pigs. However, use of this concept is strongly restricted for animals living in the enclosed facilities. In this study, Building Energy Simulation (BES) technique was used to realize the energy flow among outside weather conditions, building materials, and animals. Especially, mechanisms of sensible and latent heat generation from pigs according to surrounding air temperature and their weight were designed to accurately evaluate the THI values inside the pig house. The THI values computed by the BES model were compared to those calculated by method of the report (NIAS, 2016), the model of this study predicted the start date of heat stress about 9~76 days earlier compared to the NIAS model. Results of the BES model also showed higher frequencies of the THI above the THI threshold for pigs, indicating that conventional model has a possibility of underestimating the degree of heat stress of pigs.

Keywords: BES; heat stress; numerical model; pig; THI

1. 서 론

육류 중심의 식생활 변화에 따라 우리나라 1인당 돼지고기 소비량은 2011년 19.0 kg에서 2016년 24.1 kg (자급률 82.4%)으로 크게 증가하였으며 이에 따라 2016년 기준, 농림축산식품부의 '농림업생산액 및 생산지수' 순위에서 미국 (63.9천억원)을 제치고 돼지고기가 67.6천억원의 생산액으로 1위를 차지하였다 (MAFRA, 2018). 그러나 최근, 기후변화에 따라 국내 폭염 발생 빈도가 증가하고 있으며, 그로 인하여 가축 폐사 두수가 2012년 총 1,857천 마리 (닭 1,766천 수, 오리 79천 수, 메추리 11천 수, 돼지 727두, 소 33두)에서 2016년 4,180천 마리 (닭 3,954천 수, 오리 147천 수, 메추리 70천 수, 돼지 8.4천 두, 2016년 9월 기준) 규모로 크게 증가한 것으로 보고된 바 있다 (NIAS, 2016). 돼지는 타 축종과 비교하여 지방층이 두껍고, 땀샘이 발달하지 않아 체내의 대사열을 외부로 방출하는 능력이 떨어지고 고온 스트레스에 취약하다(NIAS,

2016). 비육돈이 고온 스트레스에 노출될 경우, 사료 섭취량이 약 30% 가량 감소하고, 단백질 합성을 촉진하는 호르몬 분비가 저하되어 증체량 및 사료효율의 감소가 발생한다고 보고된 바 있으며(Swiergiel, 1998; Collin et al., 2001; Patience et al., 2005; Ferrari et al., 2013), 포유 모돈의 경우 사료 섭취량, 유 생산, 자돈 이유체중 감소 및 폐사율 증가 등이 발생할 수 있으며, 내분비계 교란 등에 따라 발정 지연, 수태율 및 분만율의 감소 등 전반적인 번식성적 저하가 야기될 수 있다 (Quiniou et al., 2001; St-Pierre et al., 2003; Renaudeau et al., 2005; Suriyasomboon et al., 2006; Renaudeau et al., 2008). 또한, 고온 스트레스의 발생은 생산성뿐만 아니라, 동물 복지를 위협하는 요소로, 스트레스 발생의 척도로 볼 수 있는 혈중 코티졸 농도와 밀접한 관련이 있다고 다수의 연구 사례를 통해 보고된 바 있다(Kim et al., 2014). 더욱이, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate change)에서 발표한 RCP 시나리오 기반, 한반도 기후전망보고서 (KMA, 2012)에 따르면, 현재 연간 7.3일 수준의 폭염일수가 RCP 4.5의 경우 21세기 전반기 8.8일, 중반기 11.1일, 후반기 13.1일 수준으로 증가하며 RCP 8.5의 경우 10년당 2.5일 증가 추세로 21세기 후반기에는 연간 30.2일 수준으로 크게 증가할 것이라 예측되고 있어 향후 폭염 발생으로 인한 가축 피해는 지속적으로 증가될 것이라 예측할 수 있다.

한편, NRC (1971) 및 Dikmen and Hansen (2009)은 고온에 따른 가축의 고온 스트레스를 정량적으로 평가하기 위하여 기

* Research Institute for Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

** Animal Environment Division, National Institute of Animal Science, Rural Development Administration

† Corresponding author

Tel.: +82-63-238-7431 Fax: +82-63-238-7447

E-mail: kskwon0512@korea.kr

Received: June 15, 2018

Revised: June 26, 2018

Accepted: July 4, 2018

온과 상대습도의 함수로 표현되는 THI (Temperature-humidity index) 지수를 제시하였다(Ha et al., 2018). St-Pierre et al. (2003)는 미국 내 고온 스트레스에 따른 축종별 경제적 피해 규모를 산정하기 위하여 THI 지수를 산출하였으며, 고온 스트레스 발생으로 인하여 가축의 생산성이 하락하기 시작하는 모돈 및 비육돈의 임계 온도 값을 각각 74, 72로 제시하였다. 국내의 경우, IPCC의 RCP 시나리오에 따른 미래 외기 온도 및 습도 예측치를 이용하여, 젖소, 돼지, 육계, 산란계 등 축종별 미래 THI 지수 예측을 실시한 바 있다(NIAS, 2016). 그러나 자연환경을 주로 실시하는 우사와 달리, 양돈, 양계 사육 시설의 경우 주로 무창, 반 무창 형태의 시설에서 사육을 실시하기 때문에 외부 기온 및 습도 자료를 토대로 도출한 THI 지수는, 실제 가축의 고온 스트레스 지수를 반영하지 못하므로, 과소 혹은 과대평가의 우려를 지니고 있다(Ha et al., 2018). 이에, Ha et al. (2018)은 최근 농업 시설물 내부의 에너지 흐름 모의 및 부하 산정에 활발히 적용되고 있는 BES (Building Energy Simulation) 동적에너지 해석기법을 이용하여, 시간 및 외부 환경 변수에 따른 계사 내부의 에너지 발생 기작을 모델링하고, 국내 주요 지역별 육계의 고온 스트레스 평가를 위하여 시설 내부 THI 지수를 모의한 바 있다.

이에, 본 논문에서는 강제환기식 무창 자돈사를 대상으로 BES 기법을 이용하여 시설 내부의 에너지 발생 및 흐름에 대한 기작을 모사하고, 외부 환경 변화에 따른 시간별 시설 내부 온도 및 습도 계산을 통해 THI 지수를 산출하고자 하였다. 또한, 국내 주요 지역별 자돈의 고온 스트레스 노출 위험 정도를 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 대상 지역

강제환기식 자돈사 내부 THI 지수 산출을 위한 연구 대상 지역 선정을 위하여 국내 주요 행정구역별로 각 구역 내 돼지 사육 두수가 가장 많은 시군을 조사하였다. 2015년 통계청에서 발표한 국내 주요 시군지역별 돼지 사육 두수 자료를 토대로, 이천시 (214,173두, 경기도), 철원군 (100,590두, 강원도), 괴산군 (87,141두, 충청북도), 홍성군 (375,683두, 충청남도), 정읍시 (207,967두, 전라북도), 무안군 (131,976두, 전라남도), 경주시 (124,092두, 경상북도), 김해시 (123,462두, 경상남도), 제주시 (263,772두, 제주도)를 선정하였다. 자돈사 내부 에너지 흐름 모의를 위한 경계조건 중 기상 자료의 경우, 각 연구 대상 지역에 가장 인접한 기상 관측소의 2017년 온도, 습도, 일사량, 지면 온도, 현지기압 자료를 활용하여 입력자료 구축을 실시하였다 (Table 1).

Table 1 Research area for each administrative district and location of weather station for acquiring weather data.

Research areas	Selected weather stations for acquiring weather data	
	Temperature, relative humidity, and atmosphere pressure	Solar radiation
Icheon, Gyeonggi-do	Icheon	Suwon
Cheorwon, Gangwon-do	Cheorwon	Bukchuncheon
Goesan, Chungcheongbuk-do	Chungju	Cheongju
Hongseong, Chungcheongnam-do	Hongseong	
Jeongeup, Jeollabuk-do	Jeongeup	Gochang
Muan, Jeollanam-do	Mokpo	
Gyeongju, Gyeongsangbuk-do	Gyeongju	
Gimhae, Gyeongsangnam-do	Gimhae	
Jeju, Jeju-do	Jeju	

2. 실험 대상 시설

연구 대상시설은 2016년 농림축산식품부에서 발간한 축사 표준설계도 중 자돈 사육시설을 대상으로 하였다 (MAFRA, 2016). 해당 시설은 강제환기식 무창 시설 형태로 자돈방과 육성돈방이 함께 설치되어 있는 일괄사육 구조이다. 전체 건물의 크기는 폭 18.5 m, 측고 3.3 m, 동고 6.5 m, 총 길이 77.3 m이며 전체 구조 중, 복도를 중심으로 좌우 대칭 형태로 위치하고 있는 자돈방에 대한 에너지 흐름 및 부하 해석을 수행하였다 (Fig. 1).

자돈사 표준설계도 (MAFRA, 2016)는 벽체 및 지붕에 대하여 각각 두께 100 mm, 150 mm의 샌드위치 패널을 이용하여 시공할 것을 고시하고 있으며, 벽체에 대해서는 철근콘크리트를 바닥에서부터 1.2 m 높이까지 150 mm 두께로 보강할 것을 고시하고 있다. 피트 하부 바닥면은 두께 150 mm로 잡석 다짐 후 방습필름을 설치하고 버림콘크리트 50 mm, 철근 콘크리트 200 mm를 시공할 것을 고시하고 있다. 표준설계도에서 고시된 벽체, 지붕 및 바닥 시공법을 기준으로 연구 대상 자돈사 BES 해석 모델을 설계하였으며 이때 입력 자료로 활용된 자재 물성치는 다음과 같다 (Table 2).

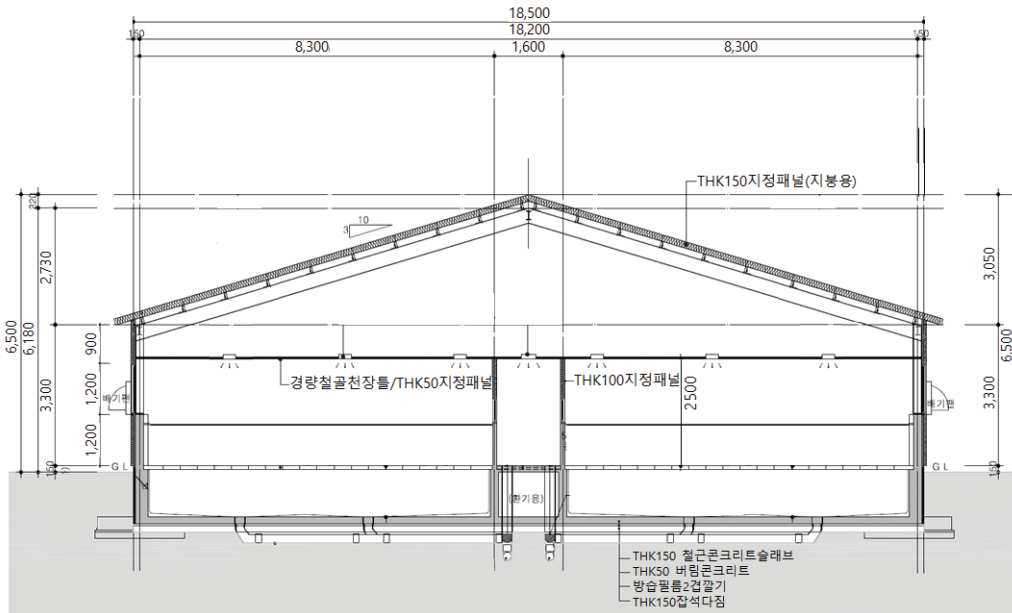


Fig. 1 Standard design of a piglet house published by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (2016) (Unit : mm).

Table 2 Physical properties of the materials used in the piglet house.

Materials	Conductivity (kJ h ⁻¹ m ⁻¹ K ⁻¹)	Thermal capacity (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	Density (kg m ⁻³)
Sandwich panel(THK 100)	0.1368	1.5	100
Sandwich panel(THK 150)	0.1404	1.5	73.33
Reinforced concrete	7.92	0.84	2,800
Concrete	6.3	0.84	2,000
Gravel	7.2	1.0	1,800
Polyethylene film	0.8792	2.3037	0.96

3. THI 지수

NRC (1971) 및 Dikmen and Hansen (2009)은 온도 및 상대습도를 이용하여 가축의 고온 스트레스를 평가하기 위한 THI 지수를 제시하였으며 이에 대한 산정식은 다음과 수식 (1)과 같다(Ha et al., 2018).

$$THI = (1.8 \times T + 32) - [(0.55 - 0.0055 \times RH) \times (1.8 \times T - 26.8)] \quad (1)$$

여기서, RH는 자돈사 내부 상대습도 (%), T는 자돈사 내부 온도 (°C)이다.

본 연구에서 자돈사를 대상으로 개발한 BES 시뮬레이션 해석 모델을 이용하여 지역별 외부 환경 조건에 따른 시설 내부 온도 및 상대습도의 시계열 변화를 모의하고, 이를 통해 THI 지수 계산을 수행하였다. St-Pierre et al. (2003)의 연구 결과를 토대로 한계 THI 지수값을 72로 설정하였으며 이를 초과할 경우, 고온 스트레스가 발생한 것으로 간주하여 분석을 실시하였다.

4. BES(Building Energy Simulation)

BES 기법은 대상 체적 내 시간에 따른 에너지 발생 및 흐름을 동적으로 모의하는 기술로서, 높은 정확도와 활용성으로 일반 건축 분야뿐만 아니라 최근 농업 시설의 에너지 흐름 및 부하 해석에도 활용되고 있다(Hong et al., 2008, Jang et al., 2009, Alvarez-Sánchez et al., 2014, Ha et al., 2015, Ha et al., 2018). BES 해석 기법 중 TRNSYS (TESS, LLC., USA)는 시간의 흐름 및 지구 자전에 따른 태양 고도 변화와 관련한 전체 시스템의 동적인 에너지 흐름 및 부하 산출을 위하여 개발된 틀로서 전달함수법에 근거하여 공간 내 열 취득 및 손실과 관련한 복사, 대류, 축열, 방열, 전도 등을 복합적으로 고려하여 동적 해석을 수행할 수 있다 (Ha et al., 2018). Ha et al. (2018)은 모듈기반 프로그램인 TRNSYS를 이용하여 육계사 내부의 에너지 발생, 손실 및 흐름을 동적으로 구현하고 내부 미기상 환경에 대한 해석 결과를 토대로 THI 지수를 산정한 바 있다. 에너지 흐름 및 평형과 관련한 지배 방정식은 Ha et al. (2018)의 논문에 기재되어 있다.

5. 시뮬레이션 환경 조건

가. 자돈 에너지 발생량

Pedersen and Sällvik (2002)이 제시하는 20°C 조건 시 돼지의 체중에 따른 에너지 발생량은 다음 수식 (2)와 같다.

$$\phi_{tot} = 7.4 \times m^{0.75} + 17.908 \times m^{0.66} [1 - (0.47 + 0.003 \times m)] \quad (2)$$

여기서 ϕ_{tot} 은 돼지의 전체 에너지 발생량 (W)이며, m 은 체중 (kg)을 의미한다. Pedersen and Sällvik (2002)은 돼지 1두당 1,000 W의 단위 에너지가 발생했을 때 온도 변화에 따른 에너지 발생량에 대한 보정식은 다음 수식 (3)과 같이 제시하였다.

$$\phi' = 1000 + 12 \times (20 - t) \quad (3)$$

여기서 ϕ' 는 주변 기온 온도에 따라 보정된 전체 에너지 발생량 (W)이며, t 는 온도 (°C)를 의미한다. 앞선 수식 (2)와 (3)을 이용하여 돼지 주변 기온에 따라 보정된 총 에너지 발생량 ϕ'_{tot} 을 수식 (4)와 같이 정의할 수 있다. 이 때, 현열 (ϕ_s) 및 잠열 (ϕ_l) 발생량은 수식 (5)와 (6)으로 정의할 수 있다.

$$\phi_{tot} = \left\{ 7.4 \times m^{0.66} + 17.908 \times m^{0.66} [1 - (0.47 + 0.003 \times m)] \right\} \times \frac{1000 + 12 \times (20 - t)}{1000} \quad (4)$$

$$\phi_s = \left\{ 7.4 \times m^{0.66} + 17.908 \times m^{0.66} [1 - (0.47 + 0.003 \times m)] \right\} \times \frac{0.62 \times [1000 + 12 \times (20 - t)] - 1.15 \times 10^{-7} \times t^6}{1000} \quad (5)$$

$$\phi_l = \phi_{tot} - \phi_s \quad (6)$$

여기서 ϕ_s 는 현열 에너지 발생량 (W), ϕ_l 는 잠열 에너지 발생량 (W)이다.

상기 제시된 돼지 1두당 현열 및 잠열 발생량 수식을 BES 시뮬레이션 모델 내 경계조건으로 반영하여 실시간으로 계산되는 시설 내부 온도 변화 및 전체 사육두수에 따라 돼지의 에너지 발생량이 변화할 수 있도록 모델을 구성하였다.

나. 시뮬레이션 연산 조건

본 논문에서는 20 kg의 자돈을 대상으로 BES 시뮬레이션 모델 설계 및 에너지 해석을 실시하였으며, 모델의 입력 자료 중 기상 자료의 경우, 2017년 지역별 일사량, 기온, 상대습도, 기압, 지면온도 등의 시간별 자료를 활용하였다. 지역별 고온 스트레스 지수 변화에 대한 상대비교를 위하여, 연중 연속하

여 자돈을 사육한다고 가정하였다. 실험 자돈사의 환기시스템 운영은 내부 온도 변화에 따라, MWPS (1983)에서 제시하고 있는 저온기, 적온기, 고온기 권장 환기량을 기준으로 실시 되도록 모델을 구성하였다 (Table 3). 20 kg 자돈의 권장 사육 온도인 22°C를 기준으로 19~25°C 구간에 대하여 적온기 권장 환기량 값을 적용하였으며, 16°C 이하 구간의 경우, 저온기 권장 환기량을, 28°C 이상의 구간의 경우, 고온기 권장 환기량을 적용하였다. 또한, 각 구간 간 환기량 값은 선형의 경향을 따른다고 가정하여, 돈사 내부 열환경에 따른 환기 경계조건을 구축하였다 (Fig. 2).

Table 3 Recommended ventilations rate of nursery pig according to weather (MWPS, 1983)

	Weight (kg)	Cold weather (CMM head ⁻¹)	Mild weather (CMM head ⁻¹)	Hot weather (CMM head ⁻¹)
Nursery pig	13.6~34.0	0.08	0.42	0.99

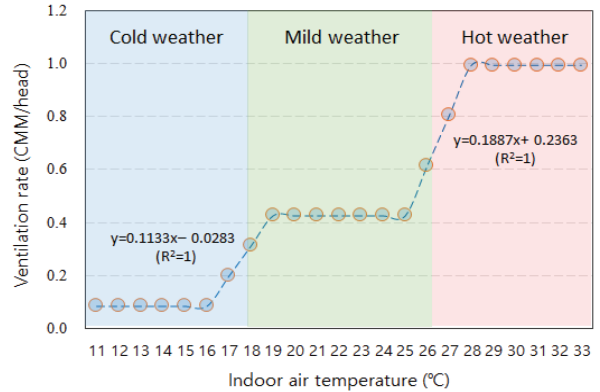


Fig. 2 Designed ventilation rates for nursery pigs (20 kg) according to indoor air temperature (MWPS, 1983)

BES 시뮬레이션 모델 내 환기 시스템 운영과 관련하여, 수치해석을 통해 산출되는 실시간 내부 온도 및 MWPS 제시 적온범위를 기준으로 자동으로 경계조건을 변경할 수 있도록 설계하였다. 단, 시뮬레이션 해석 시 칩기에 의한 영향은 없으며 향후 지역별 기후 조건에 따른 적정 냉방시스템 용량을 산정하기 위하여 냉방시설은 설치되어 있지 않다는 가정에 연구를 수행하였다.

실험 대상 자돈사의 사육 밀도는 축산법 시행령 제 14조 제 2항을 바탕으로 두당 0.3 m²를 적용하여 돈방 당 자돈 190두가 사육된다고 가정하였으며, 해당 사육 두수에 대한

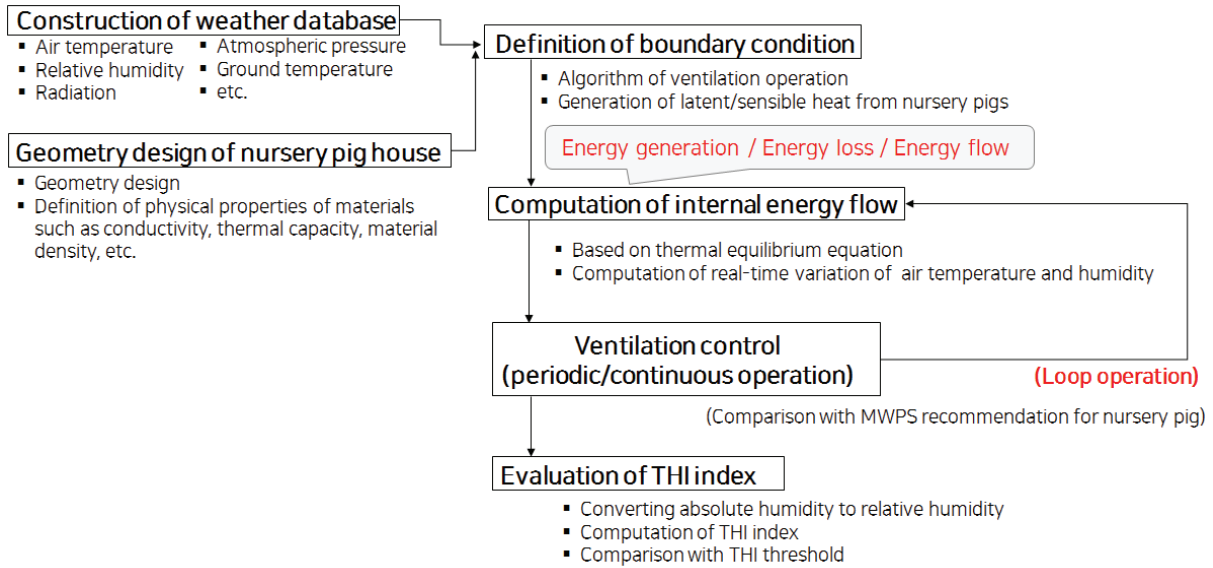


Fig. 3 Research flow to evaluate THI in nursery pig house using BES method.

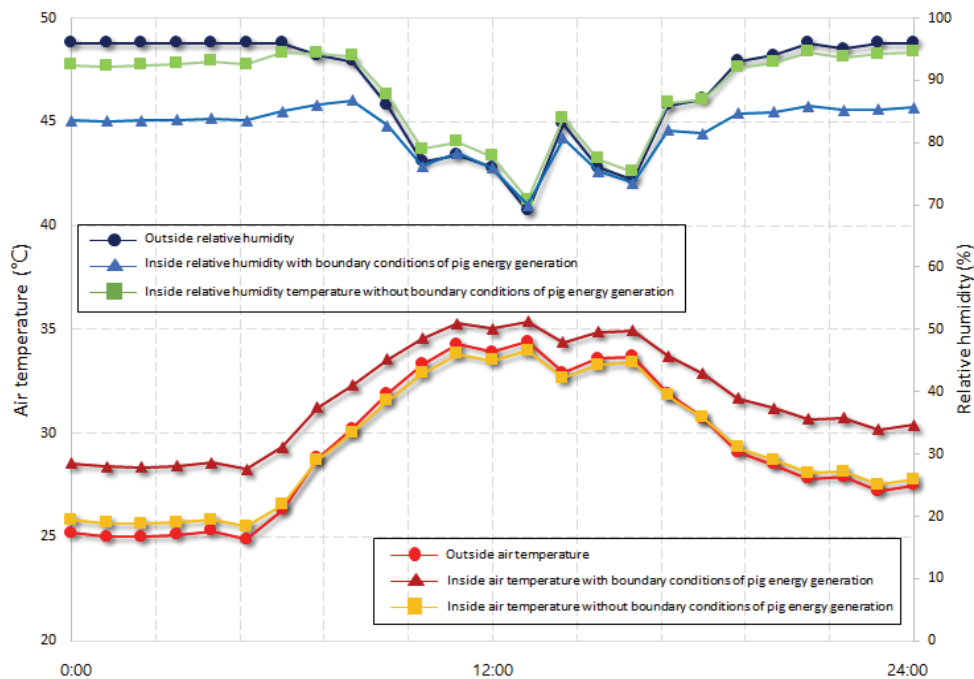


Fig. 4 BES computed air temperature and relative humidity inside the pig house with and without the pig energy generation module in Hongseong city (0:00~24:00, July 1, 2017)

현열 및 잠열 발생량을 경계조건에 반영하였다 (수식 4~6).

본 논문에서는 시설 내부 상주하는 자돈으로부터의 에너지 발생, 일사량으로부터의 열 획득, 외부 환경으로부터 벽체를 통한 열 획득 및 손실, 환기에 의한 열 획득 및 손실, 침기를 통해 발생하는 에너지 손실, 축열 및 방열 효과를 고려하여 실시간으로 변화하는 자돈사 내부의 온도 및 상대습도를 계

산하였으며 도출된 자료를 이용하여 각 시간별 THI 지수를 산정하였다. 시뮬레이션을 통해 산정된 각 지역별 THI 지수 결과를 토대로, 고온 스트레스 발생 여부 및 위험도에 대한 평가를 수행하였다. Fig 3은 본 논문의 전체 흐름에 대한 모식도이다.

III. 결과 및 고찰

1. 돼지 에너지 발생량 구현에 따른 내부 기온 및 상대습도 비교

BES 모델을 이용한 지역별 자돈사 내부 고온 스트레스 분석에 앞서, Pedersen과 Sallvik (2002)이 제시한 자돈의 체중 및 주변 기온에 따른 현열 및 잠열 발생 기작을 경계조건으로 모델에 구현하여 해당 효과에 대한 평가를 실시하였다. Fig. 4는 자돈사 내부 돼지 에너지 발생 모델 적용 유무에 따른 홍성 지역의 7월 1일 0시부터 24시까지의 시간별 시설 내부 기온 및 상대습도 변화 모의 결과에 대한 예시이다. 돈사 내부 자돈의 에너지 발생 모델을 적용하지 않은 경우, 내부 기온 및 상대습도는 외부 기온 및 상대습도 추세와 매우 유사하게 변화하는 경향이 모의되었다. 홍성 지역에 대한 BES 모델 분석 결과, 해당 모델을 적용하지 않은 경우, 2017년 1월부터 12월까지 모의 기간 동안 내부 기온은 평균적으로 약 0.5℃ 높게, 상대습도는 약 3.7% 낮게 형성되는 것으로 나타났다. 반면, 자돈으로부터 발생하는 현열 및 잠열에 대한 기작을 경계조건으로 구현할 경우, 내부 기온은 외부 기온 대비 평균 약 9.9℃ 높게 형성되었으며 상대습도의 경우, 가축으로부터 발생하는 수분을 구현했음에도 불구하고, 외부 상대습도 대비 평균적으로 약 11.8% 낮은 값을 보이는 것으로 나타났다. 이를 절대습도로 환산해볼 경우, 자돈으로부터의 잠열 구현 시 연평균 내부 절대습도가 0.01152 kg-da kg⁻¹으로, 외부 연평균 절대습도(0.00852 kg-da kg⁻¹) 대비 약 35.1% 높게 형성되는 것으로 모의되었음을 확인할 수 있었다. 이는 시설 내부 가축으로부터의 잠열뿐만 아니라 현열이 공기 중으로 방출됨에 따라 내부 기온이 증가함과 동시에 포화수증기압이 증가되기 때문에 상대습도가 낮게 형성되는 것으로 판단할 수 있다.

2. 지역별 자돈사 내부 기온 및 상대습도 모의

Fig. 5는 철원, 홍성, 제주 지역을 대상으로 모의한 7월 1일부터 31일까지의 시간별 자돈사 내부 기온 및 상대습도 변화 결과 예시이다. 자돈사 내부 온도는 시간별 일사량 및 외부 온도 변화 양상과 유사하게 증가 및 감소 경향을 보여주고 있으며, 냉방장치가 설치되지 않았다는 가정 하에 시뮬레이션을 수행하였기 때문에 적정사육온도 (22℃)를 초과하는 시점이 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 5에 도시된 바와 같이, 상대적으로 남쪽에 위치하는 제주도에서 내부 기온이 상대적으로 높게 형성되는 것으로 모의되었다. 내부 상대습도의 경우 시간별 외부 상대습도 변화 양상과 유사한 경향을 보이거나, 앞서 언급한 바와 같이, 가축으로부터 방출되는 현열 발생량으로 인하여 내부 기온 증가에 따라 포화수증기압의 증가로 인해 상대습도는 상대적으로 낮은 값을 보이는 것으로 판단된다.

지역별로 시간별 자돈사 내부 기온 및 상대습도 환경을 모의한 결과, 시뮬레이션 해석 대상 기간 중 시설 내부 최고 온도 및 해당 값의 발생 시점, 당시 내부 상대습도 등은 Table 4와 같다. 예를 들어 충청남도 홍성군의 경우, 2017년 8월 5일 오후 1시경에 자돈사 내부 기온이 35.4℃로 분석기간 중 가장 높은 온도가 모의되었으며 이 시점에서의 자돈사 내부 상대습도는 69.9%로 모의되었다. 분석기간 전체에 대한 자돈사 내부 평균 기온은 지역별로 이천시, 철원군, 괴산군, 홍성군, 정읍시, 무안군, 경주시, 김해시, 제주시에서 각각 22.3℃, 21.9℃, 22.5℃, 22.6℃, 22.7℃, 23.1℃, 23.0℃, 23.2℃, 24.1℃로 모의되었으며 이는 외부 평균 기온보다 약 9.5℃ 높은 것으로 분석되었다.

Table 4 BES computed occurrence time of the highest air temperature and averaged air temperature according to research area.

Research areas	Occurrence time of the highest air Temp.	Air Temp. (°C)	R.H. (%)	Average indoor air Temp. (°C) (1. 1.~12. 31.)	Average outdoor air Temp. (°C) (1. 1.~12. 31.)
Icheon	2017-08-05 16:00	36.7	42.2	22.3	11.8
Cheorwon	2017-08-05 12:00	34.5	64.3	21.9	10.6
Goesan	2017-08-05 16:00	36.5	46.8	22.5	12.1
Hongseong	2017-08-05 13:00	35.4	69.9	22.6	12.6
Jeongeup	2017-08-05 12:00	36.1	65.3	22.7	13.1
Muan	2017-08-04 12:00	35.3	65.1	23.1	14.3
Gyeongju	2017-07-13 15:00	38.6	32.0	23.0	13.7
Gimhae	2017-08-07 14:00	36.9	38.4	23.2	14.6
Jeju	2017-07-21 15:00	37.1	56.9	24.1	16.8

- Temp. : temperature / R.H. : relative humidity

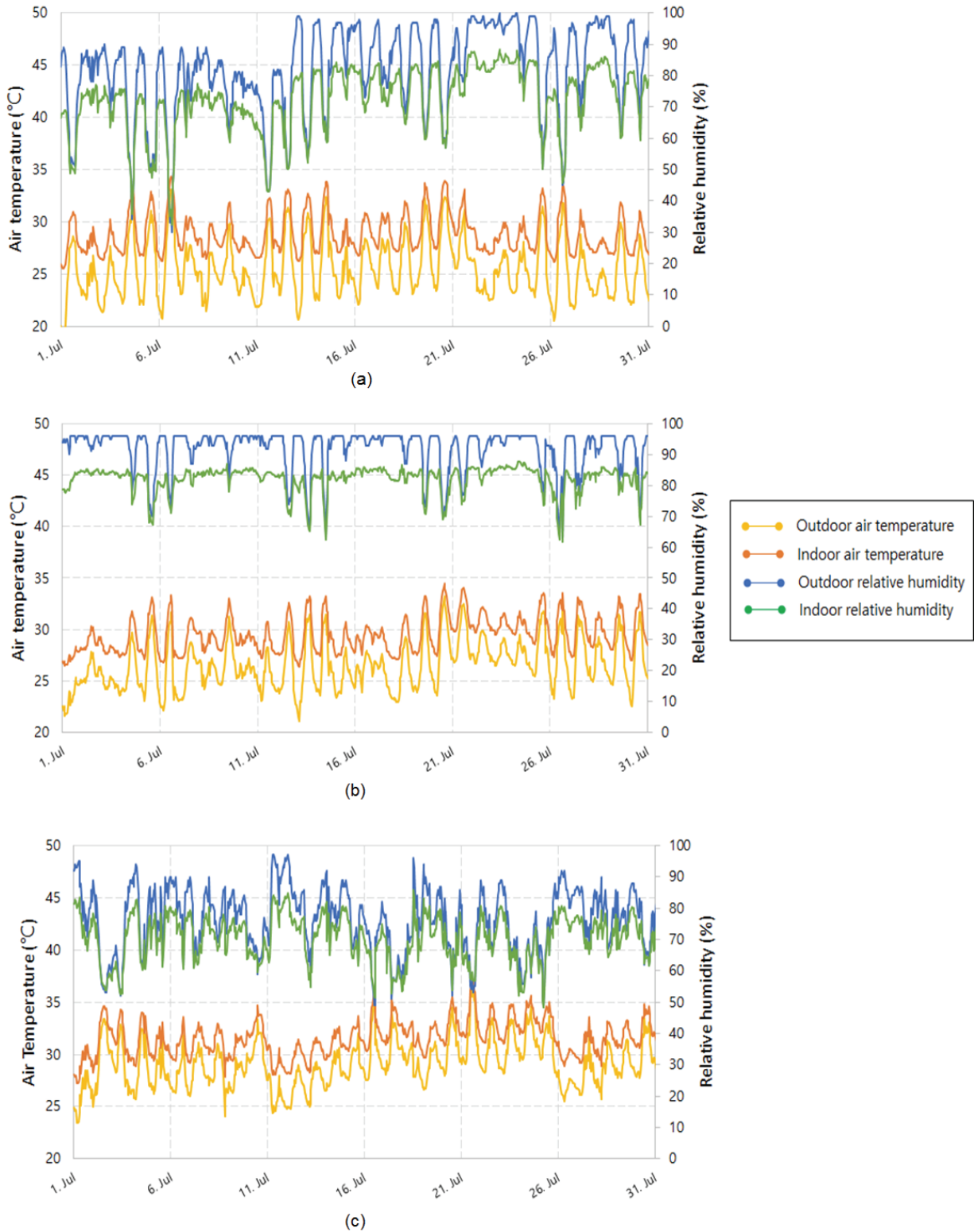


Fig. 5 BES computed air temperature and relative humidity trends inside pig house in (a) Cheorwon, (b) Hongseong and (c) Jeju city (1.~31., July, 2017)

3. 고온 스트레스 기간 분석

자돈사 내부의 고온 스트레스를 분석하기 위하여 본 연구를 통해 개발된 BES 자돈사 모델을 이용하여 모의된 시간별 자돈사 내부의 공기 온도 및 상대습도 결과를 바탕으로 THI 지수를 산출하였다. 또한 돼지가 고온 스트레스를 받기 시작하는 한계 THI 값 (72)을 기준으로 분석 기간 중 한계 THI 값을 초과하는 시간 및 일수에 대한 분석을 실시하였다. 9개 연구 대상 지역 중에서 한계 THI 값을 초과하는 시간은 제주도, 무안군, 김해시, 경주시, 정읍시, 홍성군, 괴산군, 이천시, 철원군 순으로 높은 것으로 나타났다. 이는 전체 사육시간과 비교하여 각각 49.9%, 46.1%, 45.0%, 42.2%, 41.2%, 41.0%, 37.8%, 36.4%, 34.0%를 차지하는 것으로 나타나 대체적으로 위도가 낮은 남부 지방에 위치할수록 한계 THI를 초과하는 비율이 높은 것으로 분석되었다 (Table 5). 한계 THI 초과 일수의 경우 제주시가 전체 해석 대상 기간 중 약 57.0%를 초과하는 것으로 나타났으며, 무안 (56.2%), 김해 (54.0%), 경주 (53.7%) 등이 그 뒤를 따르는 것으로 산정되었다. 한계 THI 지수 초과 비율이 가장 높은 제주시의 경우 1시간 단위 시간별 외부기온의 적산온도는 147,308°C로 모의를 진행한 9개 지역 중 가장 높은 것으로 나타났으며 적산일사량은 5,194 MJ m² 로 9개 지역 중에서 2번째로 높게 관측되었다. 전체 지역에 대한 한계 THI 지수 초과 시간 (Hour) 및 초과일 (Days)은 1시간 단위 시간별 적산온도에 대하여 선형적으로 증가 ($R^2=0.96, 0.88$)하는 경향을 보였으나 적산일사량의 경우 크게

두드러진 경향 ($R^2=0.02, 0.06$)을 보이지는 않는 것으로 나타났다 (Fig. 6).

제주시의 경우, 2017년 모의 기간 중 2월 17일에 처음으로 한계 THI 값을 초과하는 값이 산출되었으나, 그 외 연구 대상 지역 대부분 4월 5일에서 7일 사이에 최초로 한계 THI 값을 초과하는 것으로 나타났다. 이는 가축의 고온 스트레스가 비단 하절기뿐만 아니라, 환절기에도 발생할 수 있음을 반증하는 결과로 볼 수 있다. 가축사육정보시스템(NIAS, 2016)을 통해 제공되고 있는 THI 산정 방법을 이용하여, 최초로 한계 THI를 초과하는 시기를 도출할 경우 지역별로 4월 16일에서 5월 20일 사이에 형성되는 것으로 분석되었다. 본 논문에서 BES 모델을 이용하여 THI 값을 산출한 결과와 비교할 경우, 가축사육정보시스템(NIAS, 2016)이 이천시, 철원군, 괴산군, 홍성군, 정읍시, 무안군, 경주시, 김해시, 제주시에 대하여 각각 23일, 43일, 23일, 24일, 9일, 26일, 24일, 24일, 76일 늦게 고온 스트레스 발생 시점을 예측하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 가축사육정보시스템(NIAS, 2016)의 방법을 이용한 THI 지수를 산정하는 경우, 본 논문에서 제시되는 값 대비 한계 THI 초과 시간이 이천시, 철원군, 괴산군, 홍성군, 정읍시, 무안군, 경주시, 김해시, 제주시에 각각 46.0%, 45.7%, 50.4%, 50.8%, 52.5%, 50.8%, 49.3%, 45.4%, 49.6%로 낮게 산정되는 것으로 나타났다. 예를 들어, 홍성군의 경우 본 논문을 통해 산정한 한계 THI 초과 시간 및 초과일 수는 각각 3,594시간, 185일인 반면, 가축사육정보시스템을 통해 제시되는 값은 각각 1,825시간, 132일로 나타났다.

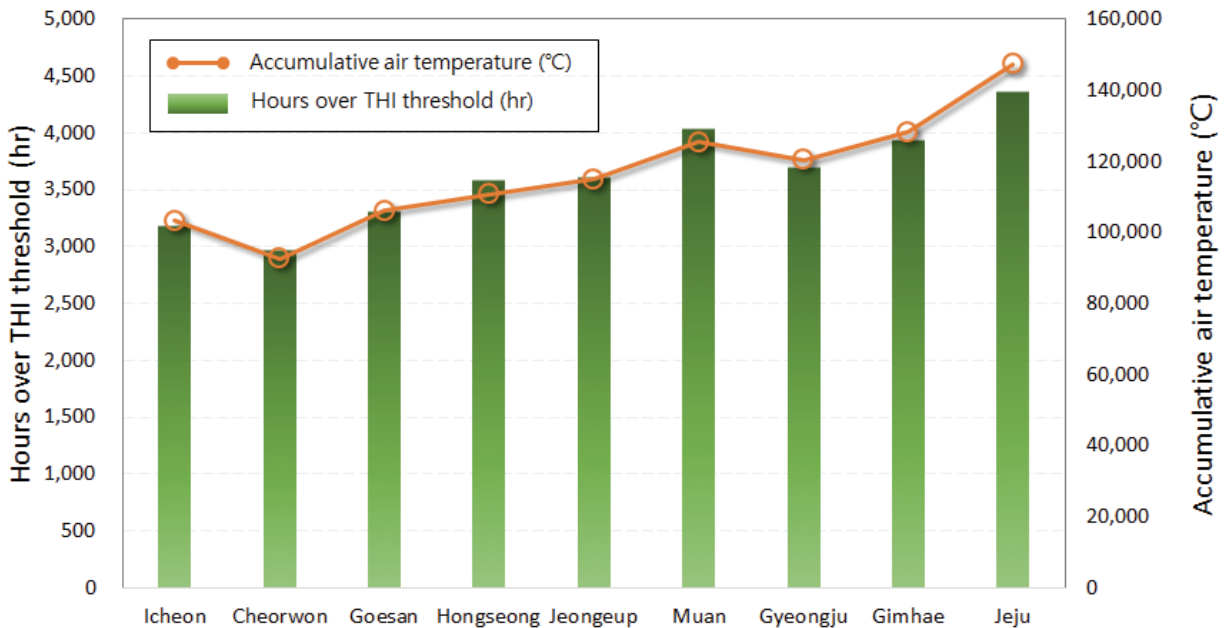


Fig. 6 BES computed hours above the THI threshold and accumulative air temperature according to research area

Table 5 Hours and days over THI threshold based on BES and NIAS methods and cumulative ambient air temperature and outdoor radiation, (1. Jan.~31. Dec. 2017)

Research area	BES method		NIAS (2016)		Cumulative air Temp. (°C)	Cumulative radiation (MJ m ⁻²)
	Hours above the THI TH.	Days above the THI TH.	Hours above the THI TH.	Days above the THI TH.		
Icheon	3,192 (36.4%)	170 (46.6%)	1,467 (16.7%)	116 (31.8%)	103,245.7	4,437.8
Cheorwon	2,975 (34.0%)	162 (44.4%)	1,361 (15.5%)	100 (27.4%)	92,603.9	5,163.4
Goesan	3,307 (37.8%)	174 (47.7%)	1,668 (19.0%)	119 (32.6%)	106,050.6	5,090.6
Hongseong	3,594 (41.0%)	185 (50.7%)	1,825 (20.8%)	132 (36.2%)	110,783.3	5,452.0
Jeongeup	3,609 (41.2%)	186 (51.0%)	1,894 (21.6%)	132 (36.2%)	114,867.5	5,138.7
Muan	4,038 (46.1%)	205 (56.2%)	2,052 (23.4%)	130 (35.6%)	125,432.2	4,643.3
Gyeongju	3,699 (42.2%)	196 (53.7%)	1,825 (20.8%)	132 (36.2%)	120,381.7	4,278.9
Gimhae	3,944 (45.0%)	197 (54.0%)	1,792 (20.5%)	130 (35.6%)	128,306.4	4,153.1
Jeju	4,374 (49.9%)	208 (57.0%)	2,170 (24.8%)	128 (35.1%)	147,308.4	5,194.0

- Temp. : temperature / TH. : threshold

이처럼 고온 스트레스가 발생하는 시점 및 기간의 차이가 발생하는 이유는 고온 스트레스를 평가하는 방법이 다르기 때문으로 판단된다. 가축사육정보시스템(NIAS, 2016)은 외부 기온 및 상대습도 데이터를 이용하여 고온스트레스를 평가하는 반면에, 본 연구의 BES 모델의 경우에는 실시간 외부 기상의 변화, 자돈사의 벽체를 통한 열에너지 전달, 돈방에 위치하고 있는 자돈으로부터 발생하는 에너지, 환기에 의한 에너지 이동을 고려하여 자돈의 고온스트레스를 보다 실제적으로 평가하였다. 본 연구의 결과와 같이 자돈사 내부는 외부의 기상과 다르게 온습도 환경이 형성되기 때문에 가축사육정보시스템(NIAS, 2016)의 방법을 통해서 자돈의 고온 스트레스 발생 가능성을 평가할 경우에는 과소평가의 우려가 있으므로 자돈사 내부의 온습도 환경을 도출한 뒤 자돈의 고온 스트레스를 평가해야 한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 BES 동적 해석 기법을 이용하여 제주도를 포함하여 각 행정구역별로 돼지 사육두수가 많은 시군 지역에 대하여 무창 자돈사 내부의 시간별 기온 및 상대습도 변화를 모의하고 THI 지수 산출하여 분석하였다. 돼지로부터 발생하는 현열과 잠열에 대한 기작을 경계조건으로 구현한 결과, 외부 기온 및 상대습도 대비 내부 기온, 상대습도가 각각 9.9°C, 11.8% 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 반면, 돼지로부터 발생하는 에너지 기작을 구현하지 않은 모델의 경우 외부 기상 대비 각각 0.5°C, 3.7% 가량의 기온 및 상대습도 차이를 보이는 것으로 나타났다.

외부 기온 및 상대습도 자료에 기반하여 THI 지수를 산출

하는 NIAS(2016)의 가축사육정보시스템이 연구 대상 지역 전체에 대하여 한계 THI 초과 일수를 약 124.3일 수준으로 제시한 바 있으나, 본 논문을 통해 모의한 결과의 경우 평균 약 187.0일이 초과하는 것으로 나타나 현행 시스템이 가축의 폭염 스트레스에 대하여 과소평가 할 우려가 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 본 논문을 통해 제시된 방법의 경우 한계 THI 초과 시점에 대하여 기존 방법 대비 약 30.2일 빠르게 예측하고 있어, 가축의 폭염 스트레스 대응을 위한 준비 작업 시기에 대한 제고가 필요할 것으로 판단할 수 있다. 이는 현행의 외부 기상자료에 근거한 THI 지수 산정법과 비교하여, 외부 기상자료뿐만 아니라 시설 내부의 에너지 발생 기작, 벽체 및 지붕 등의 단열 성능, 환기 등으로 인한 에너지 교환 등을 복합적으로 고려해야 하는 당위성을 보여주는 결과로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 정보·통신방송 연구개발 사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2018-0-00387).

REFERENCES

1. Alvarez-Sánchez, E., G. Leyva-Retureta, E. Portilla-Flores, and A. López-Velázquez, 2014. Evaluation of thermal behavior for an asymmetric greenhouse by means of dynamic simulations. *DYNA* 81(188): 152-159. doi:10.15446/dyna.v81n188.41338.

2. Collin, A., J. van Milgen, S. Dubois, and J. Noblet, 2001. Effect of high temperature on feeding behaviour and heat production in group-housed young pigs. *British Journal of Nutrition* 86: 63-70.
3. Dikmen, S., and P. J. Hansen, 2009. Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment?. *Journal of Dairy Science* 92: 109-116. doi:10.3168/jds.2008-1370.
4. Ferrari, S., A. Costa, and M. Guarino, 2013. Heat stress assessment by swine related vocalizations. *Livestock Science* 151: 29-34.
5. Ha, T., I. B. Lee, K. S. Kwon, and S. W. Hong, 2015. Computation and field experiment validation of greenhouse energy load using building energy simulation model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 8(6): 116-127. doi:10.3965/j.ijabe.20150806.2037.
6. Ha, T., K. S. Kwon, S. W. Hong, H. C. Choi, J. Y. Lee, D. H. Lee, S. Woo, K. Y. Yang, R. W. Kim, U. H. Yeo, S. Y. Lee, and I. B. Lee, 2018. Estimation of THI index to evaluate thermal stress of animal-occupied zone in a broiler house using BES method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(2): 75-84.
7. Hong, S. W., I. B. Lee, H. K. Hong, I. H. Seo, H. S. Hwang, J. P. Bitog, J. I. Yoo, K. S. Kwon, T. Ha, and K. S. Kim, 2008. Analysis of heating load of a naturally ventilated broiler house using BES simulation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(1): 39-47. doi:10.5389/KSAE.2008.50.1.039.
8. Jang, J. C., E. C. Kang, and E. J. Lee, 2009. Peak cooling and heating load and energy simulation study for a special greenhouse facility. *Journal of the Korean Solar Energy Society* 29(1): 72-76.
9. Kim, K. H., K. S. Kim, J. E. Kim, K. H. Seol, J. K. Hong, Y. H. Jung, J. C. Park, and Y. H. Kim, 2014. Changes of serum electrolytes and hematological profiles in Yorkshire at a high ambient temperature. *Journal of Agriculture & Life Science* 49(1): 103-113.
10. KMA, 2012. *Report of prediction of climate change in Korea*, Korea Meteorological Administration.
11. Kwon, K. S., I. B. Lee, and T. H. Ha, 2016. Identification of key factors for dust generation in a nursery pig house and evaluation of dust reduction efficiency using a CFD technique. *Biosystems Engineering* 151: 28-52.
12. MAFRA, 2018. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
13. MWPS, 1983. *Swine Housing and Equipment Handbook 4th Edition*, Midwest Plan Service.
14. NIAS, 2016. National Institute of Animal Science. <http://nias.go.kr>. Accessed 15, April, 2018.
15. NIAS, 2016. *Report of development of livestock adaption tool for climate change*, National Institute of Animal Science.
16. NRC, 1971. *A guide to environmental research on animals*, National Academy of Sciences.
17. Patience, J. F., J. F. Umboh, R. K. Chaplin, and C. M. Nyachoti, 2005. Nutritional and physiological responses of growing pigs exposed to a diurnal pattern of heat stress. *Livestock Production Science* 96: 205-214.
18. Perderson, S., and K. Sällvik, 2002. *Heat and moisture production at animal and house levels*, 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses, CIGR, Horsens.
19. Quiniou, N. J., D. Renaudeau, J. Milgen, and S. Dubois, 2001. Modelling heat production and energy balance in group-housed growing pigs exposed to cold or hot ambient temperatures. *British Journal of Nutrition* 85: 97-106.
20. Renaudeau, D., 2005. Effects of short-term exposure to high ambient temperature and relative humidity on thermoregulatory responses of European (Large White) and Caribbean (Creole) restrictively fed growing pigs. *Animal Research* 54: 81-93.
21. Renaudeau, D., M. Kerdoncuff, C. Anais, and J. L. Gourdine, 2008. Effect of temperature level on thermal acclimation in large white growing pigs. *Animal* 2(11): 1619-1626.
22. Swiergiel, A. H., 1998. Modification of operant thermoregulatory behavior of the young pig by environmental temperature and food availability. *Physiology & Behavior* 63(1): 119-125.
23. St-Pierre, N. R., B. Cobanov, and G. Schnitkey, 2003. Economic losses from heat stress by US Livestock Industries. *Journal of Dairy Science* 86: 52-77.
24. Suriyasomboon, A., N. Lundeheim, A. Kunavongkrit, and S. Einarsson, 2006. Effect of temperature and humidity on reproductive performance of crossbred sows in Thailand. *Theriogenology* 65: 606-628.