J. Anim. Environ. Sci. 25(3) 109~122, 2023
https://doi.org/10.11109/JAES.2023.25.3.109
ISSN 1226-0274

JAES

Research article

OPEN ACCESS

건물에너지시뮬레이션을 활용한 육계사 사육환경 및 에너지부하 평가, Part 2: 지역 및 축사구조에 따른 모델 적용

최영배[1] · 이인복[2,3*]

[1]서울대학교 지역시스템공학과 박사과정생, [2]서울대학교 지역시스템공학과 교수, [3]서울대학교 그린바이오 과학기술연구원 교수

Evaluation of rearing conditions and energy load in broiler house using building energy simulation, part 2: model application across diverse climatic and structural scenarios

Young-Bae Choi[1], In-bok Lee[2,3*]

[1]Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 1 Gwanakro, Gwanakgu, Seoul, 08826, Republic of Korea
[2]Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 1 Gwanakro, Gwanakgu, Seoul, 08826, Republic of Korea
[3]Professor, Research Institute of Green Eco Engineering, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University, 1477 Pyeongchang-daero, Daehwa-myeon, Pyeongchang-gun, Gangwon-do, 25354, Republic of Korea

Corresponding author
In-bok Lee
Seoul National University, 1 Gwanakno, Gwanakgu, Seoul, 08826, Republic of Korea
Tel : +82-2-880-4586
Fax : +82-2-873-2087
E-mail : iblee@snu.ac.kr

Received : November 24, 2023
Revised : December 14, 2023
Accepted : December 21, 2023

With a significant portion of poultry production costs, efficient energy management is imperative for sustainable growth. This study evlauated the influence of regional climate variations and structural configurations of broiler houses on their internal environments and energy demands using previously validated Building Energy Simulation (BES) model. The analysis indicated distinct thermal conditions within broiler houses, primarily driven by regional climate differences and building structures. The model effectively demonstrated the effects of various wall compositions and ventilation systems. The installation of ceiling structures in broiler houses showed a pronounced impact on maintaining appropriate rearing temperatures. Specifically, during winter, the mid-ceiling installations led to a temperature rise of up to 4.5°C, effectively reducing heating loads by 4.7% to 5.7% across various regions. In summer, activating ceiling fans in conjunction with mid-ceiling structures reduced cooling loads by 9.0% to 2.4%. These results underscore the importance of tailored building designs, ventilation systems, and energy-efficient practices for broiler houses in diverse climatic conditions. The study suggests that dynamic energy simulations could contribute to the development of more sustainable and climate-adaptive practices in broiler farming.

Key words : Broiler house, Energy load, Energy management, Ventilation system

서 론

생활수준 향상 및 식생활 변화로 인해 국내 육류 소비량이 꾸준히 증가하고 있으며, 이에 따라 축산업 또한 꾸준히 성장하고 있다. 특히 양계산업은 2021년 기준으로 생산액이 2조 2천억원에 이르며, 연평균 11%이상 증가하고 있다(KOSIS, 2023). 이러한 육계산업의 지속적인 성장을 위해서는 에너지 효율성에 대한 고려가 필수적이다. 특히, 육

Copyright ⓒ 2023 The Korean Society of Animal Environmental Science & 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.

계 생산비 중 수도·광열비와 영농시설비가 가축비와 사료비를 제외하고 약 40%를 차지하고 있기 때문에, 효율적인 에너지 관리는 더욱 중요하다 (KOSIS, 2023). 또한, 탄소 배출을 줄이고 지속가능한 농업을 추구하기 위해서는 에너지 저감이 필수적이며, 이를 달성하기 위해선 효율적인 에너지 사용에 대한 지속적인 노력이 요구된다. 그러나 최근 기후변화로 인하여 폭염, 한파 및 이상기온등의 영향이 급속도로 커지고 있으며, 2022년에는 7월에 최고기온 극값이 보고되고 12월에는 평년대비 -4°C 이상 낮은 강한 한파가 보고된 바 있다 (Moon et al., 2021; KMA, 2023).

육계사 구조는 외부 기온 변화에 민감하게 변화하며, 특히, 사계절이 뚜렷한 한국의 경우 기온이 동절기에는 최저 -30°C까지 떨어지고 하절기에는 최대 40°C까지 상승할 수 있다 (Seo et al., 2009; Škrbić et al., 2009). 육계사의 사육환경은 외부 공기환경, 단열구조 및 환기시스템에 따라 크게 변화할 수 있다 (Kwon et al., 2019). 따라서, 최적의 환경제어와 에너지 절약을 모두 고려한 건물 설계가 필수적이다 (Seo et al., 2009).

육계가 저온에 노출될 경우 육계는 체온 유지를 위해 추가 에너지를 소비하며, 이는 사료 효율의 감소와 생산성 저하로 이어질 수 있다 (Park, 2008; Kwon et al., 2019). 이와 유사하게, 육계가 고온에 노출되어 스트레스를 받을 경우 사료 효율 감소, 폐사율 증가 등의 심각한 문제가 발생할 수 있다 (Quinteiro-Filho et al., 2010). National Research Council (1981)은 가금류를 대상으로 이러한 효과를 정량화하여, 적정 사양 관리 온도가 20 ~ 21°C일 경우, 5 ~ 35°C 범위에서 약 1.5% 씩 섭취량이 감소할 수 있다고 보고하였다.

이에 따라, 주로 동절기에 육계사 내 적정한 온도를 유지하기 위해 환기량을 감소시키며, 단열 보강, 보일러 및 보온등 등의 추가적인 난방 장비를 사용한다. 또한, 하절기에는 환기량 증가, 쿨링 패드 사용 등의 조치를 통하여 육계의 적정 사양 관리 온도를 제공할 수 있다. 그러나 적절한 건물 설계와 운영에 대한 사전 분석 없이 냉·난방 장비를 설치하고 운영하는 것은 불필요한 에너지 소비와 경제적 부담을 가중시킬 수 있다.

따라서, 육계사의 에너지부하를 분석하여 설계에 요구되는 최대 냉·난방 부하 및 운영시 소모되는 비용을 예측하는 것은 육계사의 사양 관리 시스템 설계와 운영을 최적화하여 에너지 사용을 효율적으로 관리하고 비용을 절감하는 데 필수적이다. 특히, 동적에너지 해석 기법을 적용하면 정적에너지 해석 기법에 비하여 시간에 따라 변화하는 외부 기상환경, 육계의 잠열 및 현열 변화를 고려하여 보다 정확한 에너지 부하량과 내부 환경을 예측할 수 있다.

Zhou et al. (2017)은 난방비용 저감을 위해 에너지 부하 분석을 수행하였으며, 이를 통해 육계 운영일정을 조정하여 전체 에너지 소비의 12% 를 저감할 수 있는 육계 운영 방안을 제시한 바 있다. 또한, Wang et al. (2020)은 단열, 침기 및 기밀성과 환기율에 따라 육계사의 동적 에너지 부하 분석을 수행하였고, 건물 기밀성에 따라 냉방부하 및 난방부하를 각각 4.81, 11.10% 감소시킬 수 있다고 보고하였다. 건물 구조에 따른 에너지 부하 분석 연구로는 Jalali et al. (2023)이 건축 외벽에 이중창과 단열을 보강하여 에너지 소비량을 줄일 수 있는 방법을 제시하였으며, 이에 따라 난방에너지 소모를 최대 31% 저감할 수 있다 보고하였다.

그러나 선행연구의 경우 특정 지역을 대상으로만 수행되었으며, 다양한 환기구조 및 벽체구성 변화에 따른 에너지 부하 분석에 대한 연구는 부족한 실정이다. 특히, 사계절이 뚜렷한 한국의 기후 및 지역의 특성에 따른 분석과 이에 따른 육계사의 사육환경 및 에너지부하 분석에 대한 연구는 미비하며, 축사표준설계도에서 제시하는 새로운 축사구조에 대한 에너지 부하 분석 연구가 필요하다.

따라서 본 연구의 Part 2 에서는 지역별, 축사 형태에 따른 육계사의 사육환경과 에너지 부하를 평가하고자 하였다. 이를 위하여 Part 1 에서 모델을 개발 및 검증하였으며, 검증된 모델을 토대로 표준설계도 기반 육계사 BES 모델을 개발하였다. 표준설계도 기반 육계사 BES 모델은 표준설계도 정보를 활용하여 선행연구에서 수행된 육계의 현열, 잠열 및 사육정보를 분석하여 모델링 입력자료로 활용하였다. 궁극적으로 본 연구를 통해 강제환기식 육계사의 최적화된 건물 설계 및 운영 전략에 기초가 될 수 있는 정보를 제공하고자 하였다. 이러한 연구 결과는 육계사의 건물 설계자와 운영자에게 적정 건물 설계 및 운영 전략을 제공하며, 육계산업의 지속 가능한 발전을 위한 데이터로 활용될 수 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 시뮬레이션 육계사 모델

본 연구에서는 Part 1의 현장실험 모니터링 데이터를 기반으로 검증한 BES 모델을 기반으로 하여, 중천장 설치 여부, 환기 시스템 유형 및 환기량을 고려한 육계사의 에너지

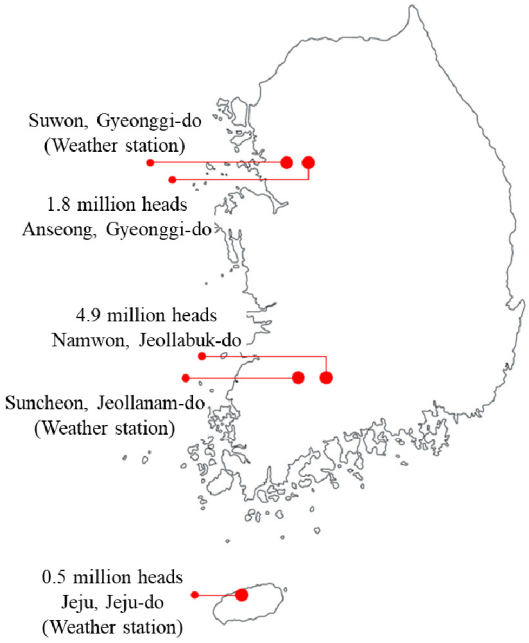

Figure 1. Selection of weather stations and broiler rearing regions for energy consumption simulation.

부하를 산정하고자 하였다. 이를 위하여, 2022 년 통계 기준 육계 사육 두수가 가장 많은 전라북도 남원시 (4,877,000 두)를 대표 지역으로 선정하였다 (KOSIS, 2023). 또한, 대표지역과 외부 기상환경에 따른 지역별 사육환경 및 에너지 부하 비교를 위하여, 경기·강원지역에서 육계 사육두수가 가장 많은 경기도 안성시 (1,846,000 두), 및 해양성 기후를 보이는 제주시 (484,040 두) 를 시뮬레이션 케이스 대표 지역으로 선정하였다. 선정된 각 지역의 기상 조건을 반영하기 위해, 해당 지역의 기상 관측소 및 인근 기상 관측소에서 제공하는 기온, 습도 및 일사량 데이터를 모델의 입력 변수로 활용하였다. 일부 결측된 데이터는 일사량을 제외하고 선형 보간법을 통해 처리하여 모델의 정확성을 향상시켰다 (Figure 1).

시뮬레이션 대상 육계사의 크기의 경우 축사표준설계도를 참고하였으며, 폭 14.3 m, 길이 114.0 m, 측고 3.3 m 및 동고 5.96 m로 설정하였다. 육계사의 내부 환경과 에너지 부하에 미치는 환기 시스템의 영향을 평가하기 위해 동일한 크기를 가진 표준설계도 기반 육계사 모델을 기준으로 하여 다양한 환기구조 시나리오를 모의하였다 (Figure 2). 이러한 비교 분석을 위해, 기존의 환기 시스템을 개선한 새로운 모델을 개발하고 이들 간의 에너지 효율성을 평가하였다.

한편, 육계사의 건물구조의 경우 표준설계도의 시공기준에 따라 바닥에 200 mm 두께의 콘크리트 슬래브와 잡석

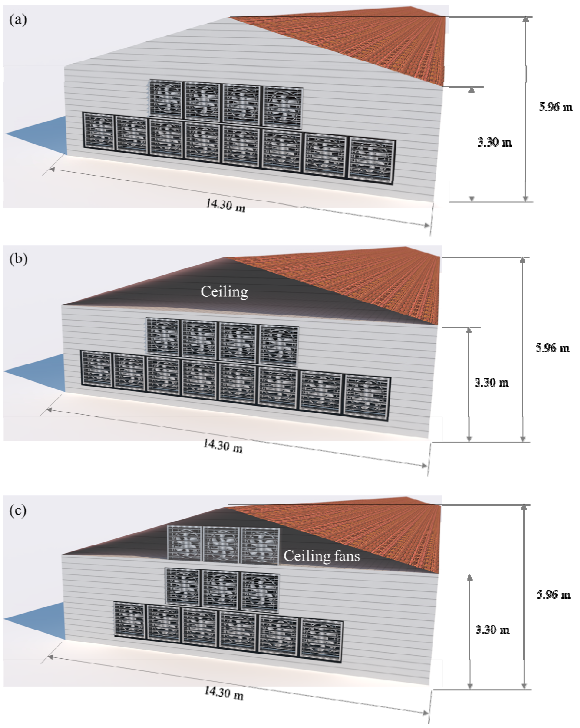

Figure 2. Construction models with diverse ventilation systems for BES simulation; (a) standard broiler house (b) broiler house with a ceiling (c) broiler house with a ceiling and ceiling fans.

Table 1. Material properties used as input data for BES simulation in broiler house model.

Materials	Conductivity (kJ/h·m·°C)	Capacity (kJ/kg·°C)	Density (kg/m^3)
Sandwich panel (THK150)	0.14	1.50	100
Sandwich panel (THK100)	0.14	1.50	73
ALC block	0.43	1.00	500
Reinforced concrete	7.92	0.84	2800
Concrete	6.30	0.84	2000
Gravel	7.20	1.00	1800
Polyethylene	0.88	2.30	1
Straw	0.80	0.10	710

위에 방습 필름 및 100 mm의 깔짚 바닥재를 사용하였다. 육계사의 벽체와 지붕은 외부온도에 따라 외부 단열에 큰 영향을 미치므로, 일반적으로 사용되는 100 mm와 150 mm두께의 샌드위치 패널을 적용하였다. 이 설계는 표준설계도 및 Ha et al. (2018)의 연구를 참조하여 결정되었다 (Table 1). 또한, 강제환기의 배기팬의 설치 개수는 모든 케이스에서 통일성을 유지하기 위해 동일한 수의 배기팬이 설치된 것으로 가정하였다.

2. 건물 에너지 시뮬레이션 (Building Energy Simulation; BES)

육계사의 에너지 부하 평가와 설계 최적화를 위하여 건물 에너지 부하의 정량적 분석이 요구된다. 특히, 축산 시설의 특성상 내부 환경은 환기에 많은 영향을 받으므로 인해 외부 조건에 민감하게 반응한다 (Cho et al., 2022). 추가적으로, 일반 주거나 상업 시설에 비해 단열성이 상대적으로 낮은 축산 시설은 시간에 따라 변하는 외부 기상 조건을 실시간으로 반영하여 에너지 부하를 예측하는 것이 중요하다 (Cho et al., 2022; Fabrizio et al., 2014; Mogharbel et al., 2014).

따라서, 본 연구에서는 육계사의 에너지 부하를 평가하기 위하여 BES 기법을 활용하였다. BES는 동적 분석 기술로서, 대상 공간의 에너지 흐름을 시계열 분석을 통해 종합적으로 고려한다. 이는 열의 전도, 대류, 복사, 축열 및 방열과 같은 다양한 에너지 교환 과정을 포함하므로, 농·축산 시설의 에너지 부하와 흐름 해석에 적합하다 (Lee et al., 2020). 본 연구에서는 TRNSYS (Version 18, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA)를 사용하여 시간에 따른 태양 고도의 변화 및 내부 조건들을 분석하였으며, Figure 3과 같은 에너지 평형 방정식을 기반으로 한 내부 환경 변화의 모의를 통해 에너지 부하를 정량화하였다 (Lee et al., 2020).

3. 육계 사육 조건 설계

건물 에너지 시뮬레이션에서 내부 발열 및 스케줄은 에너지 부하를 예측하는 데 중요한 요소이다 (Ha et al., 2018; Lee et al., 2020). 특히, 축산시설의 경우 동물에서 발생되는 열이 내부 발열에 큰 부분을 차지하므로 이를 필수적으로 고려 해야 한다 (Magni et al., 2021). 본 연구는 상업용

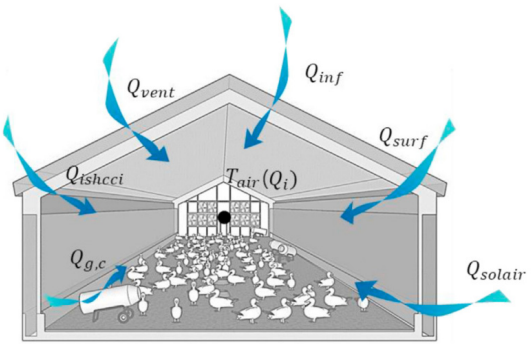

Figure 3. Energy balance on the experimental zone in BES program (Lee et al., 2020).

육계사의 사육 일정과 휴지기를 반영하여 발열량 스케줄을 설정하였으며, CIGR (2002)의 육계 체중에 따른 현열 및 잠열 발생 공식을 적용하였다 (식 (1) ~ (5)). 이러한 매개변수들은 BES 시뮬레이션의 입력 데이터로 활용되어, 시설 내 육계의 발열량, 사육 일정, 사육두수, 그리고 경계 조건의 온습도와 결합하여 에너지 부하의 정밀한 모의를 가능하게 하였다.

$$\phi_{tot} = 10.62 \cdot m^{0.75} \tag{1}$$

$$\phi_s = \frac{10.62}{1000} \cdot m^{0.75} 0.61[1000 + 20(20 - t)] - 0.228 \cdot t^2 \tag{2}$$

$$\phi_t = \frac{10.62}{1000} \cdot m^{0.75}[1000 + 20(20 - t)] \tag{3}$$

$$\phi_l = \phi_t - \phi_s \tag{4}$$

$$x_l = \frac{\phi_l}{L_v} \tag{5}$$

여기서, ϕ_{tot}는 20°C에서 육계의 전체 열 발생량 (W), m는 육계 체중 (kg). ϕ_s는 현열 발생량 (W), ϕ_t는 전체 열 발생량 (W), ϕ_l는 잠열 발생량 (W), x_l는 수분 발생량 (kg/s), 그리고 L_v는 물의 증발잠열 (W·s/kg) (2.257×10^6).

한편, 시뮬레이션 모델에서 육계 체중의 경우, 상업용 육계사의 출하체중 기준인 1.2 ~ 1.5 kg에 맞추어 Yoo (2009)가 제안한 사육일수에 따른 회귀식을 적용하였다 (식 (6)).

$$m = \frac{1}{1000}(1.1678 \cdot d^2 + 11.137 \cdot d + 35.753) \tag{6}$$

여기서, d는 사육일수 (day).

육계의 사육 일정의 경우, 실제 상업용 육계사의 사육 일정을 참고하여 시뮬레이션 기간을 설정하였다. 시뮬레이션에서 육계는 28일간 사육 후, 출하하고 다음 입식일 전까지 14일간의 휴지기간을 갖도록 가정하였으며, 동절기 3번, 환절기 2번, 하절기 3번의 사육기간을 갖는 것으로 설정하였다 (Table 2). 이를 통해 시뮬레이션 모델에서는

Table 2. Designed broiler rearing periods in the BES model.

Number of period	Rearing period	Downtime
Period 1	Jan. 15th ~ Feb. 12th	Feb. 12th ~ Feb. 27th
Period 2	Feb. 27th ~ Mar. 27th	Mar. 27th ~ Apr. 11th
Period 3	Apr. 11th ~ May. 09th	May. 09th ~ May. 24th
Period 4	May. 24th ~ Jul. 21th	Jun. 21th ~ Jul. 06th
Period 5	Jul. 06th ~ Aug. 03th	Aug. 03th ~ Aug. 18th
Period 6	Aug. 18th ~ Sep. 15th	Sep. 15th ~ Sep. 30th
Period 7	Sep. 30th ~ Oct. 28th	Oct. 28th ~ Nov. 12th
Period 8	Nov. 12th ~ Dec. 10th	Dec. 10th ~ Jan. 15th

Table 3. Appropriate rearing air temperature for broilers.

Broiler age	Air temperature in broiler house (°C)
0～1 day	34
2～3 days	32
4～6 days	30 ~ 32
2 week	28 ~ 29
3 week	26 ~ 27
4 week	24 ~ 25

육계는 연간 총 8회 사육되었다.

한편, 육계의 사육온도 관리는 입식 후 32 ~ 34°C 정도로 높게 유지하고 육계가 성장함에 따라 육계사 내부 온도를 낮추어 관리된다. 이에 따라, 육계사의 온도관리는 가축사양관리 기준을 참고하여 점차 사육온도를 낮추는 방식으로 4주령에는 24 ~ 25°C로 관리하는 일정으로 설정하였다 (Table 3).

이러한 사육온도에 따라 환기량은 겨울철 권장환기량인 0.044 CMM/kg에서 여름철 권장환기량 0.066 CMM/kg으로 가동되도록 설정하였으며, 환기량 범위는 0.0161 ~ 0.156 CMM/kg으로 설정되었다. 또한, 사육밀도는 축산법을 따라 사육밀도 0.033 m^2/두를 적용하였고 이에 따라 본 표준설계도 기반 육계사 모델에서는 총 48,720 마리를 사육하는 것으로 가정하였다.

4. 시뮬레이션 케이스 설계

본 연구에서는 다양한 환경 조건 하에서 육계사의 내부 온도 및 에너지부하를 평가하고자 하였다. 특히, 육계 사육 규모를 고려하여 선정된 안성, 남원, 제주 지역을 연구의 주요 대상지로 하여 동절기를 중점으로 이를 분석하였다. 시뮬레이션 케이스의 경우, 중천장의 존재 여부 및 중천장 팬의 작동 상태에 따라 내부 환경 및 에너지 부하를 분석하는 것으로 나누었다. 육계사의 벽체를 구성하는 재료로 샌드위치 패널, ALC 블록 및 벽돌을 선택하여, 이들이 온도 및 에너지 사용량에 미치는 영향을 비교하기 위한 총 27개의 시뮬레이션 케이스를 설정하였다 (Table 4).

Table 4. BES simulation cases assessing ventilation, fan setup, and wall materials across regions.

Location	Wall material	Ventilation system[1]	Total case
Anseong	Sandwich panel	No ceiling	27
Namwon	Atoclaved Lightweight Concrete (ALC) block	Installed ceiling (Without ceiling exhaust fan)	
Jeju	Brick	Installed ceiling (With ceiling exhaust fan)	

[1]In all cases of broiler houses, nine exhaust fans were employed.

결과 및 고찰

본 연구의 Part 1에서 현장실험을 통해 검증된 BES 육계사 모델을 통하여, 육계사의 지역별, 벽체구성 및 환기구조에 따른 사육환경 및 에너지 부하를 모의하였다. 케이스 별 에너지 시뮬레이션을 위해 선정된 지역의 환경변수(외부 온도, 상대 습도, 일사량)를 활용하였으며, 시뮬레이션 케이스로 선정된 각 인자가 내부 환경 및 에너지 부하에 미치는 영향을 분석하였다.

1. 지역별 외부기상 데이터 분석

사육두수를 기준으로 선정한 3지역의 2020년 기준의 외부기상데이터를 분석한 결과, 지역별 월간 평균 기온은 위도에 따라 안성, 남원, 제주 순서로 높게 나타났다. 특히, 동절기 제주 지역의 월간 평균온도는 7 ~ 11°C 높았으며, 하절기에는 2 ~ 3°C 높은 경향을 보였다 (Figure 4).

이러한 외부기상의 차이에 따라 건물의 온도 변화와 냉난방 부하의 변화추이가 변화하게 되므로, 지역에 맞는 적정 건물 설계는 매우 중요하다 (ASHRAE, 2021). 특히, 동적에너지 해석에서는 광에 대한 에너지 저장과 이전 시간의 에너지의 흐름이 시계열로 이어지므로, 이러한 변화추이를 고려하는 것이 필수적이다. 또한, 계절별로 외부기상 데이터를 분석한 결과, 안성의 경우 동절기 기온은 평균 0.5°C, 최저 온도는 -15.0°C로 나타났다. 하절기에는 평균 기온이 24.1°C로, 최고 온도는 34.6°C이었다. 환절기의 경

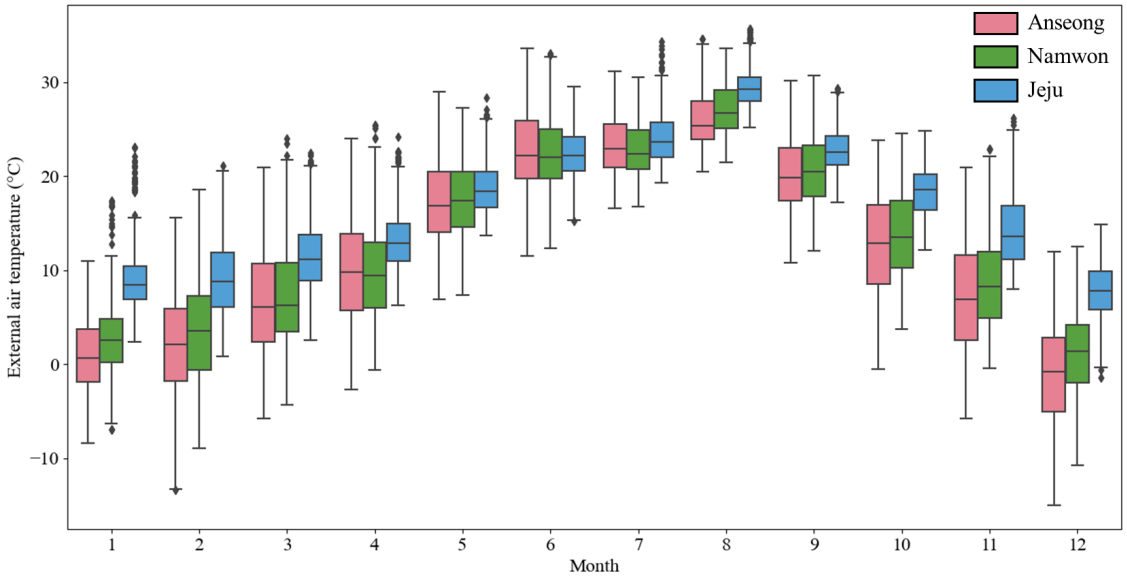

Figure 4. Monthly average air temperature comparison among Anseong, Namwon, and Jeju based on 2020 weather data.

Table 5. Seasonal statistics of temperature and absolute humidity among Anseong, Namwon, and Jeju based on 2020 weather data.

Location	Season	Avg. Temp. (°C) ± std	Highest Temp. (°C)	Lowest Temp. (°C)	Aver. AH (g/m^3) ± std	Highest AH (g/m^3)	Lowest AH (g/m^3)
Anseong	Summer	24.1 ± 3.7	34.6	11.5	17.6 ± 3.2	26.3	7.3
	Transitional	12.3 ± 7.2	30.2	-5.8	7.8 ± 4.0	21.5	1.5
	Winter	0.5 ± 5.2	15.6	-15.0	3.6 ± 1.4	10.0	0.9
Namwon	Summer	24.2 ± 3.7	33.6	12.3	17.5 ± 2.9	23.7	5.7
	Transitional	13.0 ± 6.7	30.7	-4.3	8.2 ± 4.0	22.4	1.8
	Winter	2.4 ± 4.6	18.6	-10.7	4.2 ± 1.6	12.9	1.0
Jeju	Summer	25.4 ± 3.9	35.7	15.2	18.9 ± 3.1	25.3	5.9
	Transitional	16.5 ± 5.0	29.4	2.6	9.7 ± 4.1	24.5	2.4
	Winter	8.5 ± 3.5	23.1	-1.4	5.7 ± 1.9	14.2	2.6

우 평균기온은 12.3°C였으나, 표준편차가 7.2°C로 동절기 (5.2°C) 및 하절기 (3.7°C) 보다 높아 낮과 밤의 기온차이가 높은 특징을 보이는 것으로 분석되었다. 남원의 경우, 동절기 평균기온은 2.4°C, 하절기는 24.2°C, 환절기는 13.0°C이었다. 제주의 경우, 위도가 낮기 때문에 상대적으로 높은 기온을 유지하였다. 이 때, 평균 기온은 동절기 8.5°C, 하절기 25.4°C, 환절기 16.5°C로 나타났다. 한편, 외부 기상 중 절대습도의 경우 안성은 동절기 평균 3.6 g/m^3으로 남원 (4.2 g/m^3) 및 제주 (5.7 g/m^3) 보다 낮았다. 특히, 제주의 경우 해양성 기후를 지닌 섬 지역이기 때문에 모든 계절에서 평균 절대습도가 가장 높게 나타났으며, 특히, 하절기에는 평균 절대습도가 18.9 g/m^3이었다 (Table 5).

높은 습도와 높은 온도조건이 육계사 내에 유지 되면 육계에게 열 스트레스를 유발하는 온습도 지수 (Temperature humidity index; THI)가 상승할 수 있다. 본 연구에서 분석한 외부기상 데이터를 BES 모델의 입력자료로 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 지역 특성에 따른 기상조건이 육계사 내 열환경에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 지역별 벽체 구성에 따른 육계사 내부 사육환경 평가

지역별 벽체 구성에 따른 육계사의 에너지 효율성을 평가하기 위하여, 표준설계도를 기반으로 설계된 육계사의 동적 에너지 시뮬레이션을 수행하였다. 이 후, 냉난방 부하가 크게 발생하는 하절기와 동절기를 중점으로 시뮬레이션 결과를 벽체 구성 별 (샌드위치패널, ALC, 벽돌)로 분석하였다. 분석 결과, 하절기의 경우 환기팬을 통한 환

경제어로 일부 구간에서는 적정 사육온도로 내부 환경을 유지할 수 있었으나, 동절기에서는 제주지역의 일부구간을 제외하고는 모두 사육온도를 제공하기 어려운 것으로 나타났다 (Figure 5). 이에 따라, 육계의 자체 발생열과 환기만으로는 내부 적정 사육환경 유지가 불가능 하다 (Škrbić et al., 2009). 따라서, 추가적인 에너지 투입 (쿨링패드, 보온장비 및 가온장비 등)이 필요할 것으로 판단된다. 하절기에는 입식 초기 높은 사양관리 온도 (34°C)로 인하여 일부 난방부하가 필요한 것으로 분석되었다 (Figure 5).

또한, 1주령 ~ 2주령 구간의 사육온도는 외기온도 구간과 2 ~ 3°C 차이내에 있으므로, 환기를 통해 적정 사육온도 제공이 가능하였다. 그러나 적정 사육온도가 낮아지는 3주령부터는 추가적인 냉방이 필요한 것으로 판단되었다. 특히, 외기 온도에 따라 사육온도 보다 평균적으로 안성, 남원 및 제주 지역이 각각 2.0, 3.1 및 4.9°C 높게 유지되었다. 이러한 높은 온도는 육계의 스트레스를 유발하여, 폐사율을 증가시킬 수 있으므로 적절한 환경관리 조치가 요구된다 (Cho et al., 2022; Kim et al., 2021; Quinteiro-Filho et al., 2010). 벽체 구성에 효과는 주로 사육 환경에 비해 내부 온도가 낮을 때 나타났다. 반면, 사육환경보다 높은 고

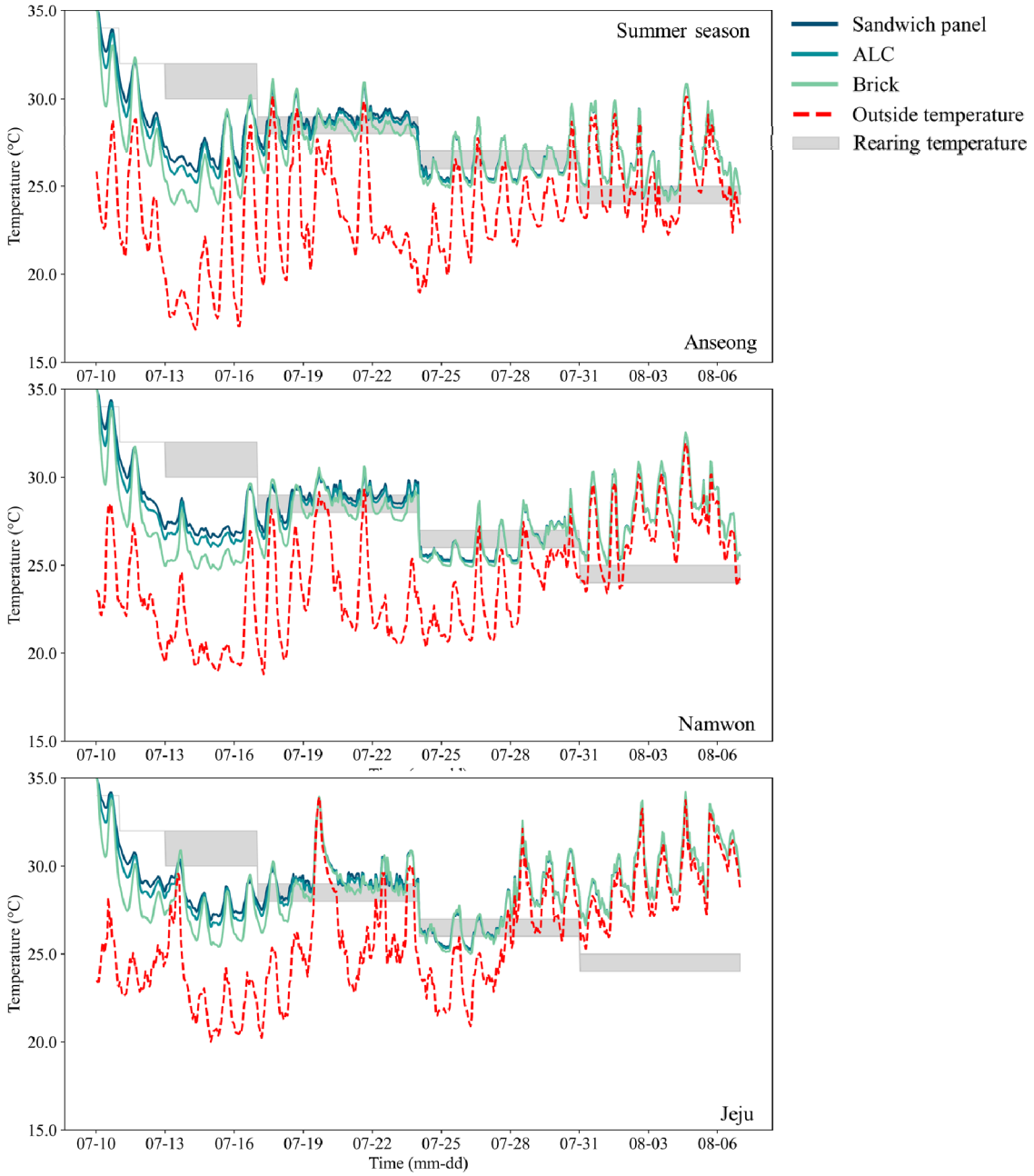

Figure 5. Comparative analysis of inside temperature in broiler houses based on wall composition during summer season.

온조건에서는 벽체 구성에 관계 없이 사육 환경이 유사하게 나타났으며, t-test 분석에서 통계적으로 유의미한 차이는 보이지 않았다 ($p>0.05$).

한편, 동절기 벽체 구성별 온도차이의 경우, 안성 지역에서 샌드위치 패널이 적정 사육온도 보다 평균 8.9 ~ 9.9°C 낮은 것에 비하여 단열성이 낮은 ALC와 벽돌은 각각 8.4 ~ 9.4°C, 10.0 ~ 11.0°C 낮아 더 많은 에너지 부하가 예상 되었다 (Figure 6). 구체적으로, 남원 지역은 샌드위치 패널이 평균 2.3°C 높게 유지 되었으며, 제주 지역에서는 평균 1.9°C 높게 유지되었다.

3. 환기시스템에 따른 육계사 사육환경 평가

MAFRA (2019)에서 제시하고 있는 육계사 내 중천장 구조에 따른 에너지 부하 평가를 위하여, 기존 표준설계도를 기반하여 중천장을 추가한 구조에 대한 에너지 부하를 평가하고자 하였다. 또한, 중천장의 경우 지붕의 일사열 전달에 의해 과도한 열이 축적될 수 있다 (Chen et al., 2021; Kim et al., 2023). 따라서, 이를 방지할 수 있는 추가 중천장 팬 설치에 대한 케이스를 고려하였다. 분석결과, 모든 지역에서 하절기와 동절기 모두 중천장을 고려한 케이스가 적정 사육온도 범위로 조절되는 일수가 중천장이 없는

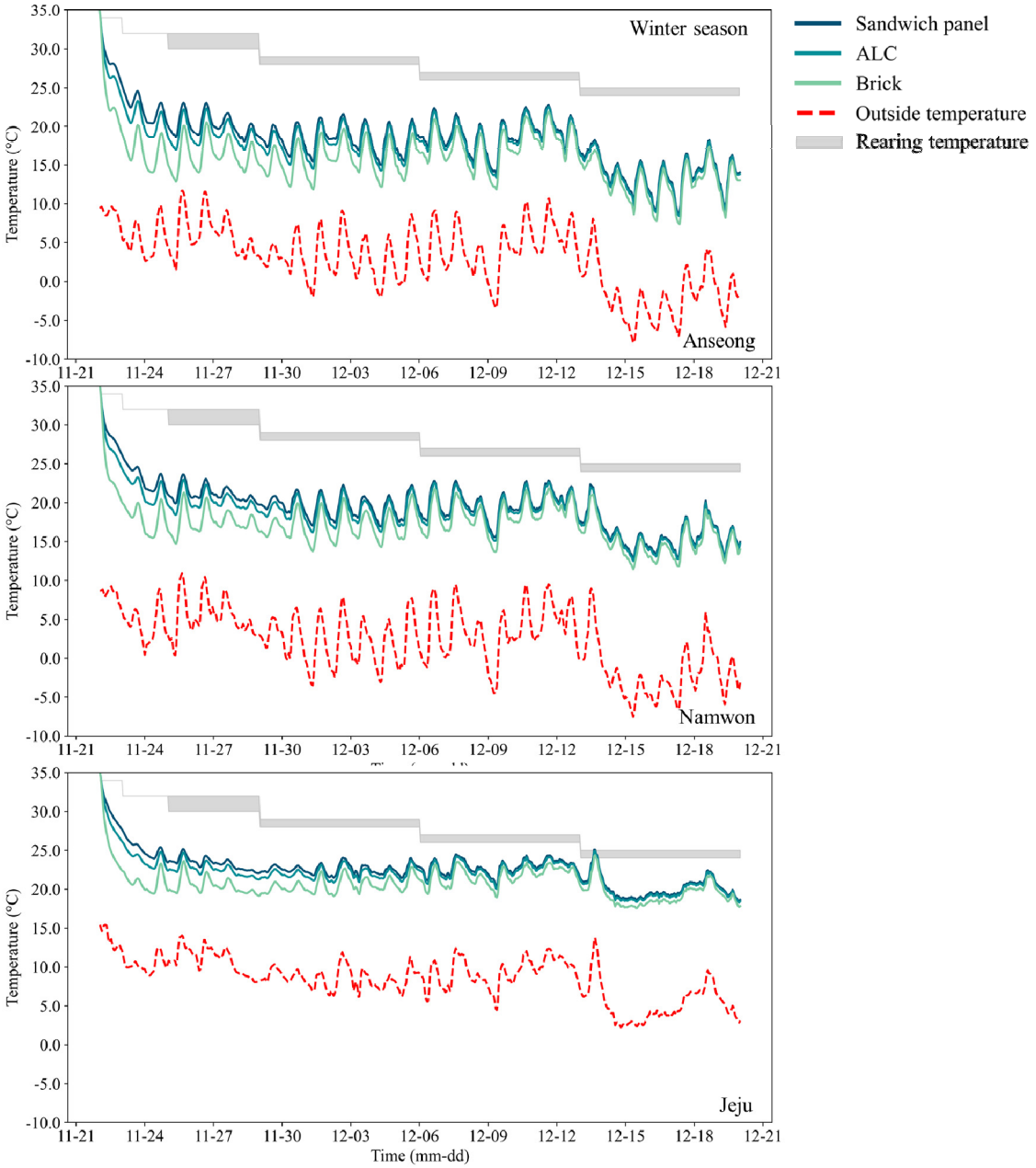

Figure 6. Comparative analysis of inside temperature in broiler houses based on wall composition during winter season.

케이스보다 많았다 (Figrue 7). 구체적으로, 1주령의 적정 사육온도인 30 ~ 34°C 조건에서 중천장에 의한 단열 효과에 따라 육계사 내부온도가 높게 유지되었으며, 적정 사육온도를 유지할 수 있었다. 이에 따라 적정 사육온도를 유지하는 일수는 최대 9.2% 상승하였다. 또한, 중천장 설치에 따라 사육공간이 감소하였고, 이에 따라 적정 사육온도가 낮아지는 사육 후반에는 중천장이 없는 육계사보다 높은 온도가 유지되었다. 그러나 중천장이 설치된 경우에는 단면 유속이 증가하여 고온스트레스 지수를 감소시키는 효과가 있기 때문에 실내 온도가 증가하더라도 바람에 의한 쿨링 효과를 함께 고려하여야 한다 (Cho et al., 2022; Guerra-Galdo et al., 2016; Lee et al., 2020). 또한, 일반적으로 육계사에는 쿨링패드 설치를 권장하기 때문에 이러한 단면유속 증가는 육계 열 스트레스 저감에 더 효과적일 수 있다. 한편, 중천장 내 쌓인 열을 배출하기 위해 팬을 설치한 경우에는 단순 중천장을 설치한 경우보다 고온기에 온도가 낮게 유지되어, 최대 1.3°C까지 육계사 온도를 낮출 수 있었다. 특히, 온도가 상대적으로 높은 제주지역에서는 하절기에 중천장 팬을 설치하였을 때 적정 사육환경을 유지하는 시간이 약 23% 증가하는 경향을 보였다 (Figure 7).

한편, 동절기의 경우 중천장을 설치할 경우 보온효과가 두드러지게 나타났으며, 지역에 상관없이 최대 4.5°C 이

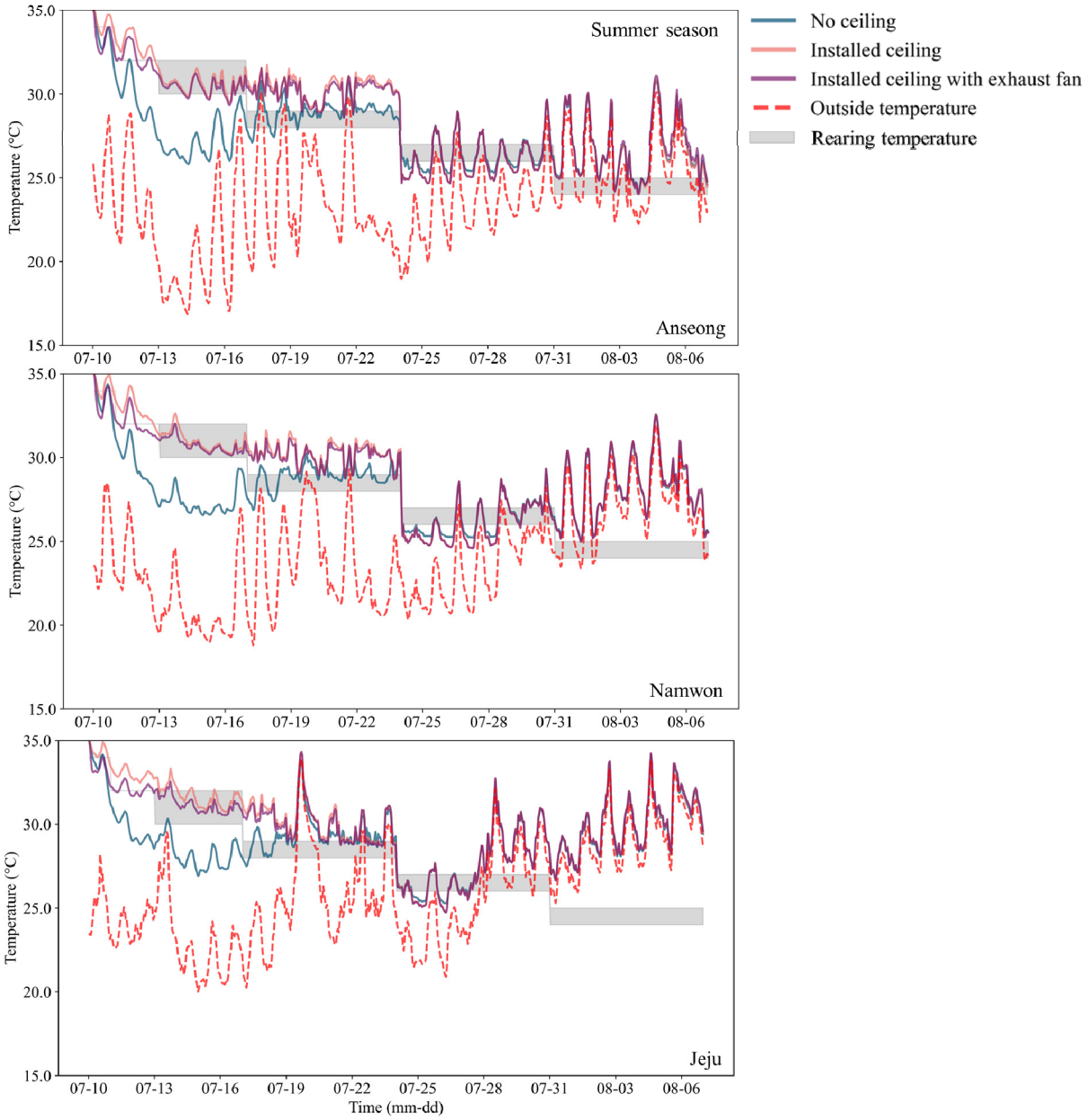

Figure 7. Comparative analysis of inside temperature in broiler houses based on ventilation system during summer season.

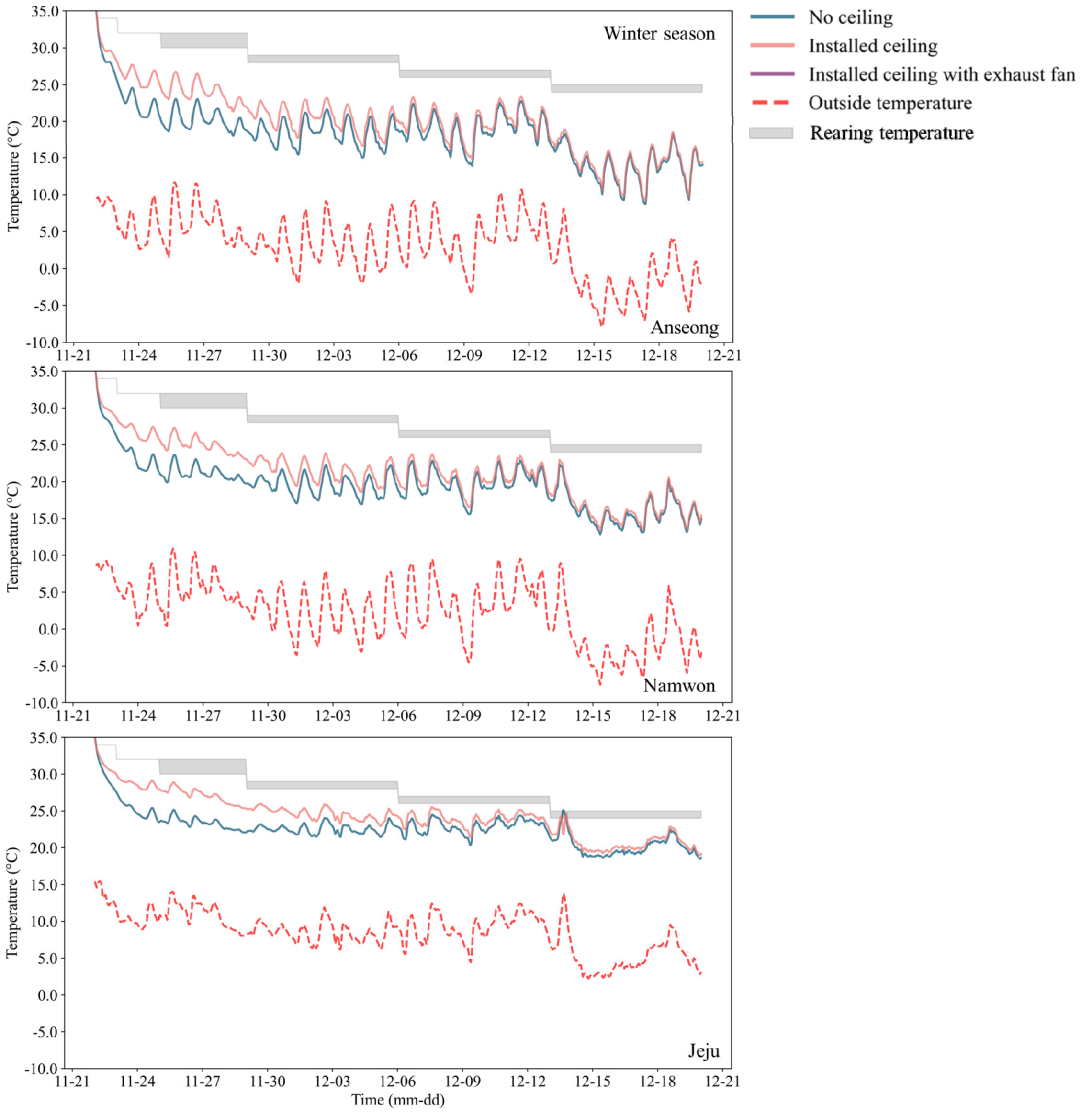

Figure 8. Comparative analysis of inside temperature in broiler houses based on ventilation system during winter season.

상의 보온효과를 보였다 (Figure 8). 평균적으로는 중천장 유무에 따라 약 1.7°C의 온도차이를 보였으며, 이에 따라 중천장 설치시 동절기 난방부하를 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 시뮬레이션 케이스에 따른 에너지 소비 및 효율성 평가

에너지 소비 및 효율성을 평가하기 위하여, BES 에서 적정 사육환경을 조성하기 위해 추가적인 냉 난방 장비를 이용하여 에너지를 투입한다고 가정하였다. 지역별 및 벽체 구성별로 사육기간에 따라 에너지 부하를 분석한 결과, 샌드위치 패널은 벽체를 벽돌로 구성한 것에 비하여 난방부하에서 약 28.1% ~ 32.2%의 저감 효과를 보였다. 특히, 안성 지역에서는 난방 부하 저감량이 가장 높았다 (Figure 9).

또한, 제주 지역의 경우 하절기 큰 냉방부하가 발생하여 모든 케이스 중 가장 높은 총 에너지 부하가 발생하였으며, 환절기에는 세 지역 모두 다른 사육기간 보다 적은 에너지 부하가 발생한 것으로 분석되었다 (Figure 10).

이는 추가적인 에너지 투입없이 환기와 육계 발열을 통해 적정 사양관리가 가능한 것으로 판단된다. 한국과 같이 사계절이 뚜렷하고 하절기의 고온과 동절기의 저온을 동시에 고려하기 위해서는 적정 환기 설계, 단열재 설계 및 외부 기상을 고려하는 것이 필수적이다. 또한, 기상 예측 데이터를 활용하여 사양관리 계획, 휴지기 관리 및 사육기간을 관리하여 추가적인 에너지 부하 투입을 절약할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 중천장 설치 및 하절기 중천장 팬 가동에 따른 에너지 부하와 효율성을 평가 하기 위해, 각 케이스 별 에너지 부하를 분석하였다. 그 결과, 중천장 설치에 의한 에너

Figure 9. Comparison of heating load across different building materials and locations.

Figure 10. Comparison of cooling load across different building materials and locations.

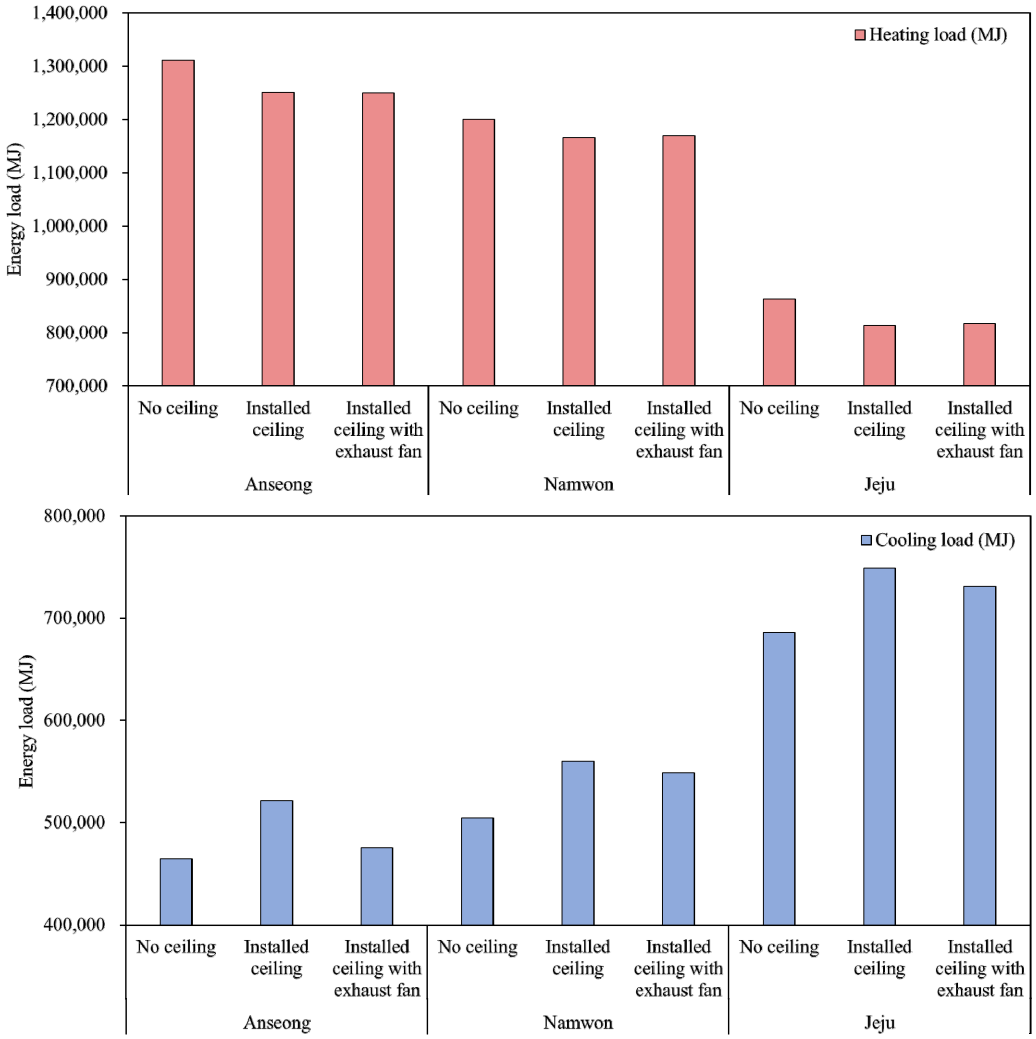

Figure 11. Heating and cooling loads in Youngin, Namwon, and Jeju: a comparative analysis based on ventilation system in broiler houses.

지 부하 저감 효과는 주로 난방부하 저감측면에서 나타났다. 구체적으로, 안성, 남원 및 제주 지역에서 각각 총 난방부하 기준으로 4.7, 2.8 및 5.7%의 에너지 부하가 절감되었다 (Figure 11). 또한, 하절기에 중천장 팬을 가동시 냉방부하가 감소하여 세 지역에서 각각 9.0%, 2.0%, 2.4% 저감되는 효과를 보였다.

중천장 설치에 따라 냉방부하가 증가한 것은 같은 건물 규격을 가정하였기 때문에 사육공간이 줄어들었고, 이에 따라 육계의 발열 대비 사육공간이 감소하여 더 많은 냉방이 요구되는 것으로 판단된다. 그러나 실제 육계의 고온스트레스는 공기온도, 습도 및 풍속 등 다양한 인자에 영향을 받으므로 중천장 설치에 따른 유속 증가와 내부 유동 변화에 따른 효과에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 사료된다.

한편, 각 케이스에 따른 최대 냉 난방부하를 분석하였으며, 이는 초기 냉난방 시스템을 설계를 위한 중요한 인자이다. 분석 결과, 모든 케이스에서 최대 냉방부하가 최대 난방부하에 비하여 높은 결과를 보였다 (Table 6). 최대 냉방부하는 최대 난방부하에 비하여 약 147.2% ~ 287.1% 높게 나타났으며, 이는 하절기 육계 연령이 높은 시기에 주로 발생하는 것으로 분석되었다. 특히, 전기간 에너지 부하에서 난방부하가 높았던 결과와 비교하면, 초기 난방장치 용량은 냉방장치보다 작은 용량이 요구되지만 유지비용 측면에서 비용이 클 것으로 판단된다.

또한, 냉방장치는 하절기의 일정 기간에만 높은 용량이 요구되므로 이에 대한 부하를 효율적으로 관리하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 BES 기법을 이용하여, 육계사의 지역, 벽체구성 및 환기구조에 따라 육계사의 사육환경과 에너지 부하를 분석하였다. 이러한 분석결과를 토대로 육계사의 에너지 부하를 저감하기 위하여, 적정한 벽체설계 및 냉난방 장비 설계가 가능할 것으로 사료된다. 따라서,

Table 6. Comparison of maximum cooling and heating load differences across various cases.

Location	Building materials	Maximum cooling load (MJ/hr)			Maximum heating load (MJ/hr)		
		No ceiling	Installed ceiling	Ceiling with fan	No ceiling	Installed ceiling	Ceiling with fan
Anseong	Sandwich panel	6,731	6,790	4,859	1,830	1,754	1,754
	ALC	6,763	6,815	4,885	1,890	1,813	1,813
	Brick	6,844	6,888	4,954	2,069	1,885	2,004
Namwon	Sandwich panel	1,400	1,367	1,367	5,091	5,149	5,161
	ALC	1,454	1,376	1,376	5,114	5,169	5,182
	Brick	1,629	1,562	1,562	5,185	5,233	5,244
Jeju	Sandwich panel	799	1,373	1,373	6,216	6,272	6,287
	ALC	815	1,390	1,390	6,242	6,296	6,312
	Brick	905	1,447	1,447	6,323	6,372	6,384

본 연구의 결과는 육계사의 건물 설계, 초기 냉난방 시스템 설계 및 에너지 운영관리에 있어 참고 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

결 론

본 연구의 Part 2에서는 지역 및 축사 구조에 따른 BES 모델의 적용과 사육환경 및 에너지 부하의 분석을 목표로 수행되었다. 이를 위해, 기존 Part 1에서 현장실험을 기반으로 육계사 BES 모델을 개발 및 검증하였으며, 이를 통해 다양한 환경 조건 및 벽체 구성에 따라 육계사의 내부 사육환경 및 에너지 부하를 평가하고자 하였다. 또한, 지역별 외부 기상 데이터 분석을 통해, 계절적 변화와 지역적 특성이 육계사의 내부 환경과 에너지 부하에 미치는 영향을 분석하였다. 지역에 따라 벽체 구성, 중천장에 의한 에너지 저감 효과는 상이하게 나타났으며, 이러한 벽체 구성과 환기 시스템의 효과는 육계사의 설계 및 운영에 있어 중요한 고려사항으로 판단된다. 특히, 중천장 구조 및 팬 설치와 같은 요소들이 육계사 사육환경과 에너지 부하 저감에 미치는 영향을 분석하였다. 특히, 중천장 설치는 동절기에는 보온 효과를, 하절기에는 중천장 팬 가동을 통해 냉방 효과를 제공함으로써 육계사 내의 적정 사육환경을 유지하는 데 효과적이었다. 이는 주로 외부 기상 온도가 높은 지역에서 중요한 역할을 할 수 있으며, 적절한 사육환경을 유지하는 기간을 증가시켰다. 본 연구는 육계사의 에너지 효율성 향상과 사육환경 개선을 위한 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 모델과 시나리오별 결과를 통하여, 기후 변화에 대응하는 육계사의 설계 및 관리 전략 개발에 활용될 수 있을 것이며, 육계 산업의 지속 가능성을 향상시키는 데 기여할 것으로 기대된다.

사 사

본 결과물은 농림축산식품부 및 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 농림식품기술기획평가원과 재단법인 스마트팜연구개발사업단의 스마트팜다부처패키지혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (421018-03).

인용문헌

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2021. ASHRAE Handbook—Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA.

Chen, L., Fabian-Wheeler, E.E., Cimbala, J.M., Hofstetter, D., Patterson, P., 2021. Computational fluid dynamics analysis of alternative ventilation schemes in cage-free poultry housing. Animals, 11(8), 2352.

Cho, J.H., Lee, I.B., Lee, S.Y., Park, S.J., Jeong, D.Y., Decano-Valentin, C., Kim, J.G., Choi, Y.B., Jeong, H.H., Yeo, U.H., Lee, S.J., 2022. Development of heat stress forecasting system in mechanically ventilated broiler house using dynamic energy simulation. Agriculture, 12(10), 1666.

El Mogharbel, O., Ghali, K., Ghaddar, N., Abiad, M.G., 2014. Simulation of a localized heating system for broiler brooding to improve energy performance. International Journal of Energy Research, 38, 125-138.

Fabrizio, E., Airoldi, G., Chiabrando, R., 2014. Study of the environmental control of sow farrowing rooms by means of dynamic simulation. In: Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning: Volume 3: Building Simulation and Information Management, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Germany. 3-11.

Guerra-Galdo, E., Calvet Sanz, S., López Jiménez, A., Estellés

Barberg, F., 2016. Simulating the thermal comfort of broilers in three designs of buildings using CFD. In: CIGR-AgEng Conference, Aarhus, Denmark. Abstracts and Full papers (pp. 1-5). Organising Committee, CIGR 2016.

Ha, T., Kwon, K.S., Hong, S.W., Choi, H.C., Lee, J.Y., Lee, D.H., Woo, S., Yang, K.Y., Kim, R.W., Yeo, U.H., Lee, S., Lee, I.B., 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.

International Commission of Agricultural Engineering (CIGR), 2002. Heat and moisture production at animal and house levels. 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses, Section II. Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences, Denmark.

Jalali, M., Banakar, A., Farzaneh, B., Montazeri, M., 2023. Reducing energy consumption in a poultry farm by designing and optimizing the solar heating/photovoltaic system. Sustainability, 15(7), 6059.

Kim, D.Y., Kim, J.H., Choi, W.J., Han, G.P., Kil, D.Y., 2021. Comparative effects of dietary functional nutrients on growth performance, meat quality, immune responses, and stress biomarkers in broiler chickens raised under heat stress conditions. Animal Bioscience, 34(11), 1839.

Kim, J.G., Lee, I.B., Jeong, D.Y., Park, S.J., Cho, J.H., Kim, R.W., 2023. Development and validation of an air recirculated ventilation system, Part 2: Evaluation of pig productivity in spring and summer seasons including examination of cooling methods. Biosystems Engineering, 230, 83-105.

KMA, 2023. 2022 Abnormal Climate Report. Design Pickup Publisher, Seoul, Republic of Korea.

Korean Statistical Information Service (KOSIS), 2023. [Online] Available at: https://kosis.kr (accessed on 20 November 2023).

Kwon, K.S., Ha, T., Choi, H.C., Kim, J.B., Lee, J.Y., Jeon, J.H., et al., 2019. Evaluation of thermal stress of poultry according to stocking densities using numerical BES model. Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, 20, 456-463.

Lee, S.Y., Lee, I.B., Kim, R.W., Yeo, U.H., Kim, J.G., Kwon, K.S., 2020. Dynamic energy modelling for analysis of the thermal and hygroscopic environment in a mechanically ventilated duck house. Biosystems Engineering, 200, 431-449.

Magni, M., Ochs, F., de Vries, S., Maccarini, A., Sigg, F., 2021. Detailed cross comparison of building energy simulation tools results using a reference office building as a case study. Energy and Buildings, 250, 111-260.

Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) and Nonghyup (NH), 2019. Standard Design of the Broiler house released copy 2019. Available online: https://www.mafra.go.kr/english/index.do (accessed on 20 November 2023).

Moon, T.H., Chae, Y., Lee, D.S., Kim, D.H., Kim, H.G., 2021. Analyzing climate change impacts on health, energy, water resources, and biodiversity sectors for effective climate change policy in South Korea. Scientific Reports, 11(1), 18512.

National Research Council (US) Subcommittee on Environmental Stress, 1981. Effect of environment on nutrient requirements of domestic animals. National Academies Press, Washington DC, USA.

Park, K.Y., 2008. Respiratory disease that are more likely to occur in winter, including pneumonia and cold-related lung damage. Monthly Korean Chicken, 151, 108-111 (in Korean).

Quinteiro-Filho, W.M., Ribeiro, A., Ferraz-de-Paula, V., Pinheiro, M.L., Sakai, M., Sá, L.R.M.D., Ferreira, A.J.P., Palermo-Neto, J., 2010. Heat stress impairs performance parameters, induces intestinal injury, and decreases macrophage activity in broiler chickens. Poultry Science, 89(9), 1905-1914.

Seo, I.H., Lee, I.B., Moon, O.K., Kim, H.T., Hwang, H.S., Hong, S.W., Bitog, J.P., Yoo, J.I., Kwon, K.S., Kim, Y.H., Han, J.W., 2009. Improvement of the ventilation system of a naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulations. Biosystems Engineering, 104(1), 106-117.

Škrbić, Z., Pavlovski, Z., Lukić, M., 2009. Stocking density: Factor of production performance, quality and broiler welfare. Biotechnology in Animal Husbandry, 25(5-6-1), 359-372.

Wang, Y., Li, B., Liang, C., Zheng, W., 2020. Dynamic simulation of thermal load and energy efficiency in poultry buildings in the cold zone of China. Computers and Electronics in Agriculture, 168, 105-127.

Yoo, J.S., 2009. New feeding and management for the production of poultry farming. Kyeheung Publishers, Republic of Korea.

Zhou, Y., Bidarmaghz, A., Narsilio, G., Aye, L., 2017. Heating and Cooling Loads of a Poultry Shed in Central Coast, NSW, Australia. In: Proceedings of the World Sustainable Built Environment Conference 2017 Hong Kong, 2127-2132.