

Research article



전산유체역학을 이용한 육계사 내 계군의 다공성매체 적용에 따른 온도 분포 분석

정호혁¹ · 여옥현² · 이상연³ · 박세준³ · 김준규³ · 크리스티나³ · 최영배³ · 조정화³ · 이인복^{4*}

¹서울대학교 농업생명과학대학 생태조경·지역시스템공학부 지역시스템공학전공 석사과정, ²서울대학교 농업생명과학대학 농업생명과학연구원 연구조교수, ³서울대학교 농업생명과학대학 생태조경·지역시스템공학부 지역시스템공학전공 박사과정, ⁴서울대학교 농업생명과학대학 생태조경·지역시스템공학부 교수

Analysis of air temperature distribution according to the application of porous media in the animal occupied zone using CFD

Hyo-Hyeog Jeong¹, Uk-Hyeon Yeo², Sang-Yeon Lee³, Se-Jun Park³, Jun-Gyu Kim³, Cristina Decano³, Young-Bae Choi³, Jeong-Hwa Cho³, In-Bok Lee^{4*}

¹MS Student, Department of Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 1 Gwanakno, Gwanakgu, Seoul, 08826, Republic of Korea

²Research Assistant Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 1 Gwanakno, Gwanakgu, Seoul, 08826, Republic of Korea

³PhD Student, Department of Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 1 Gwanakno, Gwanakgu, Seoul, 08826, Republic of Korea

⁴Professor, Department of Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 1 Gwanakno, Gwanakgu, Seoul, 08826, 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 16, 2021

Revised : December 21, 2021

Accepted : December 22, 2021

This study was conducted to determine the significance of the computational results according to the application of the porous media in the occupied zone when analyzing air temperature distribution in the broiler house using computational fluid dynamics. For such experimental conditions, outside air temperature was controlled in two circumstances : 1) air temperature in summer and 2) air temperature in winter. Also, ventilation methods were controlled in two circumstances as well : 1) tunnel ventilation and 2) cross ventilation, differentiating the amount of ventilation. In these controlled settings, the analysis of one way classification model was adopted to investigate the possible effects on the result. As a result, the calculation results showed significant differences depending on the application of porous media in all cases except for cases that run maximum ventilation during winter.

Key words : Broiler house, Computational fluid dynamics (CFD), Porous media, Ventilation method

서론

우리나라 육계 사육두수는 꾸준히 증가하여 2012년 약 7600만 마리에서 2015년에는 약 8200만 마리, 2020년 9756만 마리로 증가하였다 (Statistics Korea, 2021). 또한, 1인당 육계 소비량 역시 2010년 약 13.3kg 에서 2019년에

는 약 18.7 kg으로 육계 산업에 지속적인 성장이 이루어지고 있다 (KNCA, 2021). 육계산업이 성장하면서 사육가구는 줄었으나 대규모 사육농가의 비중이 지난 20년간 431농가에서 1322 농가로 3배가량 증가하여 사육두수는 1.6배 증가하였다 (Statistics Korea, 2021). 육계의 사육 형



태가 규모화 되었을 뿐만 아니라, 제한된 공간에서 육계 공급량을 늘리기 위해 고밀도 집중형사육이 이루어지고 있다. 이러한 사육 형태는 사육 시설 내부에 미세먼지와 유해가스 등 시설 내 취약한 환경을 조성하여 닭과 작업자의 건강을 위협하는 요소로 작용한다 (Jo et al., 2015; Banhazi et al., 2008; Wilson et al., 2008). 또한, 기후변화로 인하여 이상기후 현상이 더해져서 폭염과 한파에 따른 하절기와 동절기의 기온 편차가 증가하고 있어 적정 사육환경의 조성이 더욱 어려워지고 있다 (Ji and Park, 2015).

이러한 변화에 대응하여 육계사 내부의 공기, 열 유동을 분석하고 적절한 환기시스템을 구축하기 위한 연구가 진행되어왔다. Rojano et al. (2015)는 자연환기식 육계사에서 열과 수증기, 이산화탄소의 유동을 전산유체역학을 이용하여 분석하였고, Kwon et al. (2012)은 강제환기식 육계사를 대상으로 크로스 환기 시, 다중 입기슬롯에서의 입기류 도달거리를 측정하고 이에 대한 특성을 연구하였다. 이와 같은 전산유체역학 (CFD)을 이용한 연구들에서는 계군의 영역을 단순히 빈 공간으로 설정한 경우가 많다. 그러나 실제 계군 영역에서는 육계에 의한 압력강하가 발생하므로 수치해석 시뮬레이션을 통하여 실제 계사환경을 정확하게 구현하기 위해서는 계군의 영향으로 인한 공기 유동학적 변화를 고려할 필요가 있다.

계군의 영향으로 인한 공기유동학적 변화를 고려하기 위하여 실제 육계의 형상을 그대로 모델링하는 방법이 이상적이나 세밀한 형상학적 정보를 모델에 반영할 경우에는 해석 도메인 내 격자의 수가 기하급수적으로 증가하기 때문에 시뮬레이션의 연산시간이 크게 증가하게 되어 비효율적이다. 이에 대한 해결책으로 계군의 영역을 직육면체의 다공성매체 (Porous Media)로 설정하는 방법이 많은 연구에 적용되고 있다 (Cheng et al., 2018; Du et al., 2019; Heymsfield et al., 2020). 그러나 계군을 다공성매체로 설정하는 것이 시뮬레이션의 정확도를 정량적으로 얼마나 향상시키는 지에 대한 분석은 이루어진 바 없다. 이에 본 연구에서는 육계사의 다양한 환기 조건에 따른 온도 분포에 대하여 계군의 다공성매체의 적용 여부가 수치해석 시뮬레이션 결과에 유의미한 차이를 발생시키는지 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 대상시설

상업용 육계사는 농장의 위치, 부지 형태 및 농장 여건

등에 따라 형태가 다양하기 때문에 시설의 대표성을 위하여 농림축산식품부의 ‘2016년 축사 표준설계도’의 육계사를 대상시설로 선정하였다. 표준설계도에서는 육계사의 규모를 길이 114.0 m, 폭 14.0 m, 높이 5.4 m로 결정하고 있다. 상업용 육계사에서 주로 사용되는 환기 구조는 크로스 환기와 터널 환기 구조로 본 연구에서는 두 환기 구조를 모두 고려하였다.

2. 시뮬레이션 도구 (Computational Fluid Dynamics, CFD)

육계사 내 공기유동 분석을 위하여 수치해석 시뮬레이션 도구로써 전산유체역학 (CFD)을 이용하였다. 전산유체역학은 유동현상을 지배하는 편미분 방정식의 해를 수치적으로 계산하는 방법으로 유체 및 에너지의 이동현상의 해석에 필요한 방정식인 질량, 운동량, 에너지 보존법칙 (식 (1), (2), (3))을 미소의 체적에 적용하여 얻어진 비선형 연립방정식의 해를 구하는 것이다. 기본적인 형상 모델을 만들고 계산 영역 내 격자를 설계하는 전처리 과정과 계산영역에서 각 격자에서의 공기유동학적 특성값에 대한 계산을 수행하고 이를 분석하는 주처리 과정으로 구분할 수 있다 (Seo et al., 2008). 본 연구에서는 수치해석 시뮬레이션 도구로 Fluent (ver. 18.2, Fluent Inc. N.H., USA)를 사용하였다.

이 때, 유동해석 및 수치해석을 할 때 있어서 가장 큰 영향을 미치는 요인은 난류모델이다. 본 연구에서는 실내 유동해석에서 보편적으로 사용되는 난류모델이며 Heymsfield et al. (2020)의 육계 관련 연구에서 사용된 Standard k-ε 난류모델을 이용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \vec{v} v_i) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) \\ & = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\tau \cdot \vec{u})) + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도 (kg m^{-3}), \vec{u} 는 유체의 속력 (m s^{-1}), S_m 는 화학반응에 의한 질량 Source항, p 는 정압 (Pa), τ 는 응력텐서 (Pa), \vec{g} 는 중력가속도 (m s^{-2}), \vec{F} 는 외력 벡터

(N m^{-3}), E 는 에너지 (J), k_{eff} 는 유효전도율 ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-3} \text{K}^{-1}$), T 는 온도 (K), \vec{J}_j 는 물질의 확산플럭스, S_h 는 화학반응이나 복사에 의한 엔탈피 증가 ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-3}$)를 나타낸다.

시뮬레이션 모델 설계

1. 육계사 설계

육계사 모델은 농림축산식품부의 '2016년 축사 표준설계도 (육계사)'와 달리 본 연구는 길이에 따라 육계사의 입·배기 구조 및 형상이 동일하기 때문에 시뮬레이션 시간을 단축하기 위하여 길이를 60 m로 설계하였다. 배기팬과 입기슬롯, 입기판은 연산 격자 설계가 용이하도록 직사각형 형태로 설계하였으며, 동절기 환기를 위한 입기슬롯과 하절기 환기를 위한 입기창이 설계되었다.

2. 계군 영역 설계

계군의 영역은 직육면체 형태의 다공성매체로 설계하였다. 다공성매체는 내부에 빈 공간을 갖는 물질로, 공기가 통과할 수 있지만 압력강하가 일어나면서 유체의 거동에 저항체로 작용한다. 압력강하량은 다음 식 (4) 와 같이 나타내어진다. 이때 F 값과 D 값은 Du et al. (2019)의 연구를 참고하여 x, y, z 축별로 Table 1과 같이 상이하게 설정하였다. 계군의 높이는 4주령 육계에 해당하는 0.3 m로 설계하였으며 계군에서의 식 (5) (Pedersen and Sällvik, 2002)를 참고하여 발열을 고려하였다. 현열과 잠열을 포함한 총 발열은 1690 W m^{-3} 으로 계산되었다.

$$\Delta P = (\mu v D + F \frac{1}{2} \rho v^2) \Delta m \quad (4)$$

$$\Phi = 10.62 * m^{0.75} \quad (5)$$

여기서, ΔP 는 압력강하량 (Pa), u 는 공기의 점성계수 ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$), v 는 공기 유속 (m s^{-1}), D 는 점성 저항 (m^{-2}), F 는 관

Table 1. Boundary conditions of animal occupied zone (Du et al., 2019).

X-direction		Y-direction		Z-direction	
F	D	F	D	F	D
11381.20	0.82	22005.50	3.23	7121.50	2.27

성저항 (m^{-1}), ρ 는 공기 밀도 (kg m^{-3}), Δm 은 다공성 물질의 두께 (m)을 의미하며, Φ 는 마리당 발열량 (W animal^{-1}), m 은 육계의 무게 (kg)이다.

3. 환기 구조 설계

2016 표준 축사 설계도 (육계사)의 환기방식은 계사 길이 방향의 한쪽 끝에 배기팬을 설치되어있다. 하절기에는 측벽의 쿨링패드 및 입기창을 통해 바람이 터널을 통과하듯 계사 내부를 통과하는 방식으로 공기의 흐름이 빨라 하절기 고온기에 육계의 체감온도를 낮춘다. 동절기에는 측벽의 입기슬롯을 통해 입기된 공기가 배기팬을 통하여 배기된다. 따라서, 대상 육계사의 환기 구조를 구현하기 위하여 12개의 배기팬과 40개의 입기슬롯 (동절기), 2개의 입기창 (하절기)로 구성하였다 (Table 2).

그러나, 대부분의 국내 육계사의 환기방식은 터널 환기 방식과 측벽에 설치된 배기 팬과 입기슬롯을 이용한 크로스 환기 방식을 혼합하여 사용하고 있기 때문에 (Kwon, 2012) 크로스 환기 방식에 대한 분석 또한 필요하다. 크로스 환기는 계사의 한쪽 측면에 배기팬을 설치하고 반대편 측면에 입기구를 설치하여 공기가 계사 내부를 가로질러 통과하는 방식이다. 따라서, 본 연구에서는 크로스 환기방식을 구현하기 위하여 한쪽 측벽에 12개의 배기팬을 구현하고 반대편 측벽에 20개의 입기슬롯 (동절기), 1개의 입기창 (하절기)로 구성하였다 (Table 3).

육계는 40 g의 병아리가 입추되어 30일 전후에 1.5 kg으로 출하된다. 주령이 경과함에 따라 계분의 배설량이 많아

Table 2. Dimension of inlet and outlet when operating tunnel-exhaust fans.

Parameter	Size	Installation number (EA)
Exhaust fan	1.4 m × 1.4 m	12
Slot-opening	0.5 m × 0.25 m	40
Winch curtain	24.0 m × 1.2 m	2

Table 3. Dimension of inlet and outlet when operating cross-exhaust fans.

Parameter	Size	Installation number (EA)
Exhaust fan	1.1 m × 1.1 m	12
Slot-opening	0.5 m × 0.25 m	20
Winch curtain	56.4 m × 1.3 m	1

Table 4. Computational conditions of CFD simulation model.

Parameter		Condition		
Computational state		Steady-state		
Energy		activate		
Viscous model		Standard $k-\epsilon$		
Operating condition	Pressure (kPa)	101.325		
	Gravity (m s^{-2})	-9.81		
Boundary condition	Wall ($^{\circ}\text{C}$)	27.0 (summer)		1.4 (winter)
	Ventilation rate ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	9.44 (minimum)	33.04 (normal)	56.63 (maximum)
	Total heat generation (W m^{-3}) (latent and sensible heat)	1690		
	Ventilation method	Tunnel and cross exhaust fan		
Season		Summer or Winter		
Ventilation rate		Min., Norm., Max.		
Application of porous media		With or Without porous media		

지고 이산화탄소와 암모니아 가스 농도도 증가하게 된다. 따라서 계절별, 주령별 환기요구량에 맞게 시설 내부 환기량을 조절해야하며, 계사의 구조, 일령, 외부 기상조건, 사양관리방법 등을 고려한 환기가 필요하다. Kwon (2017)은 계절 및 주령에 따른 최소환기량을 제시하였다. 4주령 육계의 수당 필요환기량은 동절기 0.493 CMH, 하절기 6.796 CMH로 나타났다. 동절기에도 육계의 경우 1일령에 수당 0.068 CMH의 환기를 해야 하며 10,000 수를 사육하는 계사는 680 CMH의 환기를 해서 산소를 공급하고 내부의 유해가스 등을 배출해야 한다. 출하 시기에 해당하는 4주령에 대해서는 하절기에 10,000 수를 사육하는 경우 68,000 CMH의 환기량이 요구된다.

4. 실험방법

환기 구조에 따른 육계사 내부 계군의 온도 분포를 분석하기 위하여 터널환기, 크로스환기 방식을 구분하여 설계하였으며 계절에 따라 하절기, 동절기로 구분하였다. 또한, 계군의 다공성매체에 적용에 따른 계군 내 온도분포의 유의성을 판단하기 위하여 다공성매체의 적용여부를 구분하였으며 Kwon (2017)에서 제시한 하절기 및 동절기 환기량을 참고하여 하절기를 최대환기량, 동절기를 최소환기량, 두 환기량의 평균을 중간 환기량으로 구분하였다. 따라서 총 연산 case를 24가지로 구분하여 연산결과를 분석하였다. 수치해석 모델을 정상상태 조건에서 해석을 수행하였으며 하절기 및 동절기의 육계사 내 열환경 및 공기

환경 분석을 위하여 대입한 경계조건은 Table 4와 같다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 다공성매체의 적용여부에 따른 계군에서의 온도 분포의 유의성 판단을 위하여 계군 높이 (바닥으로부터 0.3 m)에서의 온도 분포를 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 환기 구조, 환기량 및 계절에 따른 계군 내 온도 분포를 분석하였으며 일원분산분석을 통해 다공성매체에 적용에 따른 계군의 온도 분포 변화의 유의성을 판단하였다.

결과 및 고찰

1. 터널 환기시 하절기 및 동절기 온도 분포

하절기 터널 환기의 공기유동은 우측 배기팬에 의하여 좌측 벽면의 입기창을 통해 외기가 유입되어 배기팬을 통해 외부로 배기된다. 하절기 터널 환기를 실시할 경우의 계군 내 온도분포 분석결과는 Figure 1 및 Table 5와 같다. 최소환기 조건에서의 계군의 평균 온도는 계군에 다공성매체를 적용하지 않은 case와 적용한 case 각각 31.99, 32.41 $^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 이는 계군에 다공성매체가 적용됨에 따라 계군 내 공기유동을 방해하여 외기에 의한 계군 내 공기교체가 감소하며, 정체된 공기가 계군의 발열에 의하여 데워지기 때문에 다공성매체를 적용하지 않은 case보다 적용한 case가 평균 온도가 높게 형성된 것으로 판단된다. 환기량이 증가함에 따라 다공성매체의 적용여부와 상관없이 계군 내 평균온도는 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 환

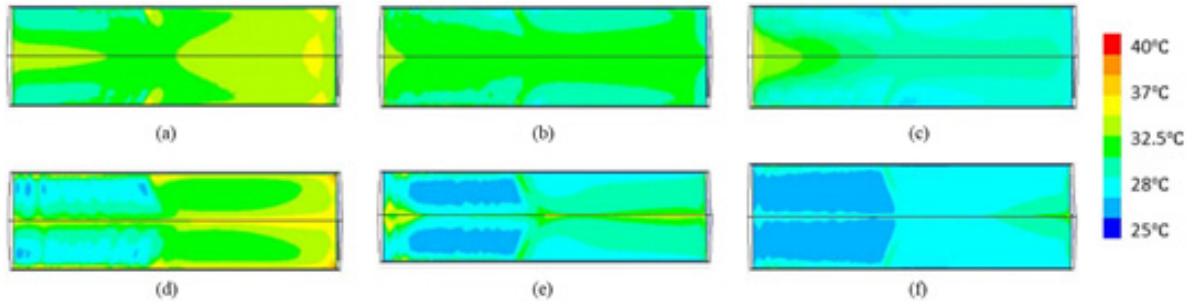


Figure 1. Air temperature distribution using tunnel exhaust fan in summer. (a) : minimum ventilation rate with porous media, (b) : normal ventilation rate with porous media, (c) : maximum ventilation rate with porous media, (d) : minimum ventilation rate without porous media, (e) : normal ventilation rate without porous media, (f) : maximum ventilation rate without porous media.

Table 5. Air temperature distribution using tunnel exhaust fan in summer.

Porous media	Min. Ventilation rate			Norm. Ventilation rate			Max. Ventilation rate		
	Avg.	Std.	P-value	Avg.	Std.	P-value	Avg.	Std.	P-value
With	32.41	1.04	0.005	31.24	0.92	0.000	30.50	1.27	0.000
Without	31.99	2.09		30.39	1.60		29.24	1.31	
Difference	0.42	1.05	-	1.05	0.68	-	1.26	0.04	-

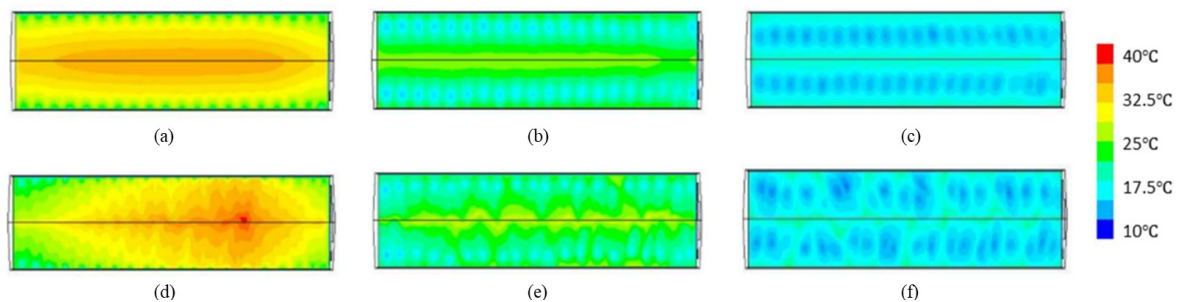


Figure 2. Air temperature distribution using tunnel exhaust fan in winter. (a) : minimum ventilation rate with porous media, (b) : normal ventilation rate with porous media, (c) : maximum ventilation rate with porous media, (d) : minimum ventilation rate without porous media, (e) : normal ventilation rate without porous media, (f) : maximum ventilation rate without porous media.

기량이 증가함에 따라 계군 내 온도 감소량은 다공성매체를 적용하지 않은 case가 더 높게 나타났으며 다공성매체의 적용여부에 따른 계군 내 온도차이는 감소하는 경향을 보였다. 표준편차는 대부분의 케이스에서 1°C 이상의 값을 나타내었다. 이는 터널 환기 특성상 외기가 입기구를 통해 계사 내부로 유입되어 배기팬에 의하여 외부로 배기되기까지 벽체 및 계군 등 계사 내부의 열원에 의하여 온도가 증가하여 온도 편차가 발생하기 때문이라 판단된다. 또한, 다공성매체를 적용하지 않은 case가 더 높게 나타났다. 이는 터널 환기시 육계사 내부에 상대적으로 강한 유동이 형성되어 표준편차가 높게 나타났으며, 다공성매체를 적용한 경우 내부 공기의 유동이 감소하며 표준편차가 낮게 형성된 것으로 판단된다. 하절기의 모든 환기량 조건에서 다공성매체를 적용한 case와 적용하지 않은 case의 p-value

는 0.05이하로 다공성매체에 의해 모두 유의한 차이가 발생한 것으로 나타났다. 하절기의 모든 case에서 4주령 육계의 적정온도인 20~22°C 기준을 충족시키지 못하는 것으로 나타났으며 환기량의 변화에 따른 계군 내 온도 변화는 다공성매체를 적용한 case가 0.24, 다공성매체를 적용하지 않은 case가 0.34로 나타나 환기에 따른 계군 내 온도 감소효과가 낮은 것으로 나타났다 (Table 7). 따라서 쿨링 패드와 같은 보조적인 냉방시스템이 필요할 것으로 판단된다.

동절기 터널 환기의 공기 유동은 우측 배기팬에 의하여 측벽에 위치한 입기슬랏을 통해 외기가 유입되며 배기팬을 통해 외부로 배기된다. 동절기 터널 환기의 경우 계군 내 온도분포 분석결과는 Figure 2 및 Table 6과 같다. 최소 환기를 실행한 경우 계군 내 평균온도는 다공성매체를 수

Table 6. Air temperature distribution using tunnel exhaust fan in winter.

Porous media	Min. Ventilation rate			Norm. Ventilation rate			Max. Ventilation rate		
	Avg.	Std.	P-value	Avg.	Std.	P-value	Avg.	Std.	P-value
With	30.65	3.40	0.003	22.65	2.05	0.013	18.05	1.68	0.521
Without	31.60	3.84		23.12	2.27		17.95	1.97	
Difference	-0.95	0.44	-	-0.48	0.22	-	0.10	0.29	-

Table 7. Air temperature change depending on the ventilation rate.

$\frac{\Delta T }{\Delta \text{Ventilation}}$	With porous media	Without porous media
Tunnel exhaust fan in summer	0.24	0.34
Tunnel exhaust fan in winter	14.0	15.2

치해석 모델에 적용한 case와 다공성매체를 적용하지 않은 case 각각 30.65, 31.60°C로 나타나 4주령 육계의 적정 온도에 비하여 높은 온도분포를 보였다. 또한, 최소환기로 인하여 내부 유속이 낮게 형성됨에 따라 입기슬롯에 의해 입기된 공기가 계사 내부로 천천히 유입되어 측벽 부근의 유입된 공기가 정체된 곳과 유입공기가 도달하지 못한 계사 내 중앙부와의 온도편차가 크게 나타나 표준편차가 하절기에 비하여 높게 나타났다. 환기량이 증가함에 따라 유입된 외기의 온도에 의하여 계군 내 온도는 감소하였다. 환기량을 Normal로 유지한 경우 계군 내 온도는 22.65, 23.12°C로 4주령 육계의 적정온도와 가장 유사하게 나타났다. 다공성매체를 적용한 case가 다공성매체를 적용하지 않은 case에 비하여 계군 내 온도의 표준편차가 작게 나타났다. 이는 입기슬롯으로부터 유입된 상대적으로 무겁고 차가운 공기가 계군으로 낙하할 때 다공성매체에 의하여 낙하를 방해받기 때문에 온도편차가 다공성매체를 적용하지 않은 case에 비하여 작게 나타나는 것으로 판단된다. 최대 환기 실행 시, 일원분산분석을 통해 다공성매체를 적용한 case와 적용하지 않은 case의 p-value는 0.521로 나타나 다공성매체에 의한 결과의 유의성이 없는 것으로 나타났다 (Table 11). 동절기의 외기 유입량에 따라 계군 내 온도변화는 다공성매체의 적용여부에 따라 14.0~15.2°C로 하절기에 비하여 높게 나타났다 (Table 7). 이는 동절기의 외부 기온과 계사 내부 기온의 차가 하절기에 비하여 높게 나타나기 때문에 외기의 유입량이 증가할수록 내부의 온도가 감소하기 때문이라 판단된다.

2. 크로스 환기시 하절기 및 동절기 온도 분포

하절기 크로스 환기를 실시할 경우의 계군 내 온도분포

분석결과는 Figure 3 및 Table 8과 같다. 하절기 크로스 환기 시, 다공성매체의 적용여부에 따른 육계사 내부의 공기 온도 차는 전반적으로 터널 환기보다 낮게 나타났다. 이는 터널환기에 비하여 크로스 환기 시 유입되는 외부 공기가 배기되기까지의 이동거리가 상대적으로 짧기 때문에 다공성매체에 의한 공기유동의 저항을 비교적 덜 받기 때문이라 판단된다. 그러나, 터널 환기에 비하여 환기량에 따른 내부 온도 변화율은 낮게 나타났다 (Table 10). 따라서, 고온스트레스를 줄이기 위한 적합한 환기방식은 터널 환기로 판단된다. 계군 내 온도 분포를 contour를 통해 확인한 결과, 터널 환기에 비하여 정성적으로 온도 분포가 고른 것으로 나타났다. 이는 강한 기류가 형성되지만 크로스 배기팬의 경우 유입되는 공기의 이동거리가 짧고 계사 내부 전체에 걸쳐 비슷한 공기 교체가 발생하기 때문에 공기 온도의 분포가 상대적으로 균일하다고 판단된다.

동절기 크로스 환기의 경우의 계군 내 온도분포 분석결과는 Figure 4 및 Table 9과 같다. 동절기 크로스 환기의 경우 측벽 입기슬롯으로 유입된 차갑고 상대적으로 무거운 외부공기가 계군 내부로 낙하하여 계군 내 온도를 감소시키고 반대편 측벽 배기팬을 통해 외부로 배기된다. 따라서, 환기량의 증가에 따른 계군 내 온도 감소는 다른 연산 조건들에 비하여 높게 나타났다. 환기량에 따라 다공성매체를 적용한 case가 다공성매체를 적용하지 않은 case에 비하여 공기온도 변화가 작게 나타났으며 이는 다공성매체의 압력강하를 통하여 온도변화가 감소하는 것으로 간주할 수 있다 (Table 10). 최대환기 실행 시, 일원분산분석을 통해 다공성매체를 적용한 case와 적용하지 않은 case의 p-value는 0.059로 나타나 다공성매체에 의한 결과의 유의성이 없는 것으로 나타났다 (Table 11).

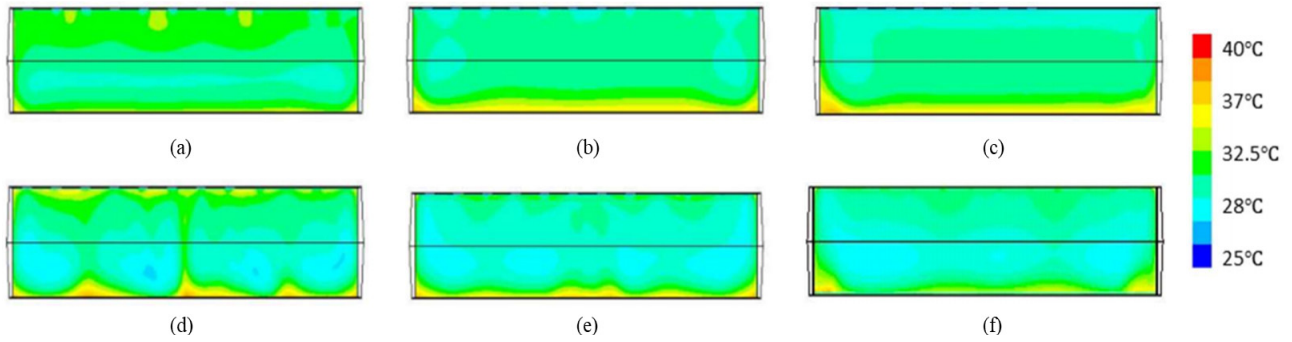


Figure 3. Air temperature distribution using cross exhaust fan in summer. (a) : minimum ventilation rate with porous media, (b) : normal ventilation rate with porous media, (c) : maximum ventilation rate with porous media, (d) : minimum ventilation rate without porous media, (e) : normal ventilation rate without porous media, (f) : maximum ventilation rate without porous media.

Table 8. Air temperature distribution using cross exhaust fan in summer.

Porous media	Min. Ventilation rate			Norm. Ventilation rate			Max. Ventilation rate		
	Avg.	Std.	P-value	Avg.	Std.	P-value	Avg.	Std.	P-value
With	32.03	0.86	0.001	31.87	1.24	0	31.71	1.32	0
Without	31.66	1.57		31.22	1.57		30.82	1.48	
Difference	0.37	0.71	-	0.65	0.33	-	0.89	0.16	-

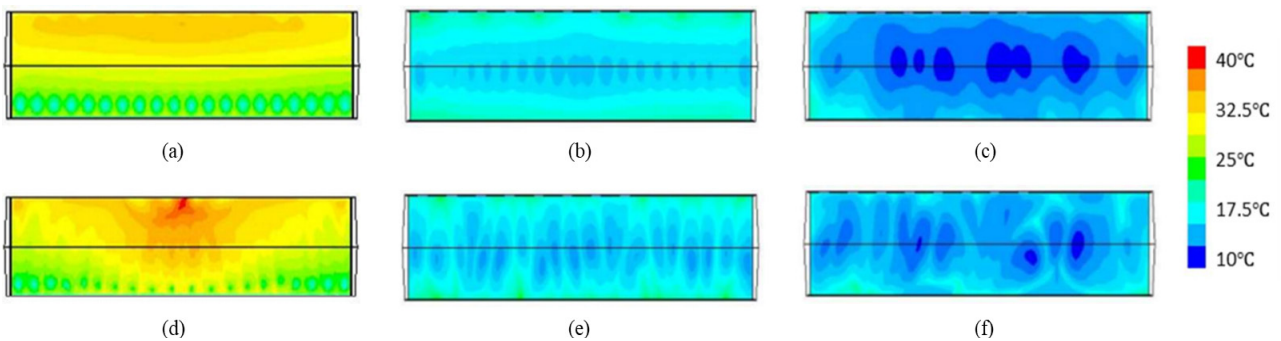


Figure 4. Air temperature distribution using cross exhaust fan in winter. (a) : minimum ventilation rate with porous media, (b) : normal ventilation rate with porous media, (c) : maximum ventilation rate with porous media, (d) : minimum ventilation rate without porous media, (e) : normal ventilation rate without porous media, (f) : maximum ventilation rate without porous media.

Table 9. Air temperature distribution using cross exhaust fan in winter.

Porous media	Min. Ventilation rate			Norm. Ventilation rate			Max. Ventilation rate		
	Avg.	Std.	P-value	Avg.	Std.	P-value	Avg.	Std.	P-value
With	29.00	3.15	0.001	18.09	1.85	0.023	13.98	2.10	0.059
Without	29.98	3.24		17.69	2.08		13.62	2.13	
Difference	-0.98	0.09	-	0.40	0.23	-	0.37	0.03	-

Table 10. Air temperature change depending on the ventilation rate.

$\frac{\Delta T }{\Delta \text{Ventilation}}$	With porous media	Without porous media
Cross exhaust fan in summer	0.07	0.18
Cross exhaust fan in winter	16.7	18.2

Table 11. Significance test of average air temperature difference in animal occupied zone by application of porous media.

Classification	Ventilation rate	Test statistic	P-value
Tunnel exhaust fan in summer	Min.	8.03	0.005
	Norm.	136	0.000
	Max.	120	0.000
Tunnel exhaust fan in winter	Min.	8.58	0.003
	Norm.	6.10	0.014
	Max.	0.412	0.521
Cross exhaust fan in summer	Min.	10.7	0.001
	Norm.	28.6	0.000
	Max.	50.3	0.000
Cross exhaust fan in winter	Min.	11.8	0.001
	Norm.	5.23	0.023
	Max.	3.58	0.059

결론

본 연구는 수치해석 모델을 이용하여 육계사 계군 내 공기온도 분포에 대한 연구를 진행함에 있어서 계군을 다공성매체로 설정한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하고자 하였다. 수치해석 모델은 CFD 시뮬레이션 도구를 이용하여 설계되었고 연산을 위하여 Fluent 프로그램을 사용하였다. 외부 기온을 하절기와 동절기로 구분하였으며, 환기방식을 터널 환기와 크로스 환기로 나누었다. 환기량을 4주령 육계의 최소환기량과 최대환기량을 기준으로 최소, 일반, 최대 환기 3단계로 구분하여 연산을 진행하였다. 연산 결과를 바탕으로 계군 내 온도분포를 분석하였으며 각 연산조건에서 다공성매체의 적용여부에 대한 온도분포의 유의성을 일원분산분석을 통하여 평가하였다.

시뮬레이션 결과, 하절기에는 환기량의 증가에 따른 내부 온도 변화율이 터널 환기를 시행한 case가 크로스 환기를 실행한 case보다 높게 나타났다. 따라서, 고온스트레스 저감을 위하여 최대환기에 근접한 환기를 시행하는 하절기의 경우 적정 환기 방식은 터널 환기로 판단된다. 동절기에는 환기량의 증가에 따른 내부 온도 변화율이 터널 환기를 시행한 case가 크로스 환기를 실행한 case보다 낮게 나타났다. 하지만, 외부의 기온과 계사 내 온도가 극명하게 차이나는 동절기의 경우 계군 내 적정온도 유지를 위하여 최소환기를 시행한다. 최소환기 시, 터널 환기방식의 표준 편차는 크로스 환기방식에 비하여 더 높게 나타나기 때문에 내부의 균일한 온도분포를 위해서는 크로스 환기방식이 적합할 것으로 판단된다.

일원분산분석을 바탕으로 온도분포의 유의성을 평가한

결과, 동절기에 최대환기량을 시행한 터널 환기방식 및 크로스 환기방식 모두 p-value가 0.05 이상으로 유의성이 없는 것으로 나타났으며 그 외 연산 조건에서는 모두 유의한 차이가 발생하였다. 그러나, 동절기 환기 시 계군 내 적정 온도 유지를 위하여 환기량을 최대로 운영하는 경우는 드물기 때문에 일반적인 연산 조건에 있어서 계군의 다공성매체 적용여부는 연구결과에 유의미한 차이를 줄 수 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 오직 육계사에 대하여 다공성매체의 적용성에 대한 분석을 수행하였으나 우사와 돈사 등 다른 축사들에 대해서도 다공성매체에 대한 적용성 검토가 필요할 것으로 사료된다.

인용문헌

- Banhazi, T.M., Seedorf, J., Laffrique, M., Rutley, D.L., 2008. Identification of the risk factors for high airborne particle concentrations in broiler buildings using statistical modelling. *Biosystems engineering*, 101(1), 100-110.
- Cheng, Q., Wu, W., Li, H., Zhang, G., Li, B., 2018. CFD study of the influence of laying hen geometry, distribution and weight on airflow resistance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 144, 181-189.
- Du, L., Yang, C., Dominy, R., Yang, L., Hu, C., Du, H., Jiang, X., 2019. Computational Fluid Dynamics aided investigation and optimization of a tunnel-ventilated poultry house in China. *Computers and Electronics in Agriculture*, 159, 1-15.
- Heymsfield, C.L., Liang, Y., Costello, T.A., 2020. Computational fluid dynamics model of air velocity through a poultry

- transport trailer in a holding shed. *Applied Engineering in Agriculture*, 36(6), 963-973.
- Ji, E.S., Park, K.H., 2015. Study on the impacts and counter-measures of climate change on livestock agriculture. *Journal of Animal Environmental Science*, 21(2), 47-54.
- Jo, Y.S., Kwon, K.S., Lee, I.B., Ha, T.H., Park, S.J., Kim, R.W., Lee, S.N., 2015. Measurement of dust concentration in a naturally ventilated broiler house according to season and worker's access. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 57(6), 35-46.
- Korean Native Chicken Association (KNCA), 2021. Chicken consumption (retrieved 2021.08.20.)
- Kwon, K.S. 2017. Major matters for the successful ventilation operation of broiler house during the winter season.
- Kwon, K.S., Ha, T.H., Lee, I.B., Hong, S.W., Seo, I.H., Jessie, P.B., 2012. Analysis of jet-drop distance from the multi opening slots of forced-ventilation broiler house. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(2), 55-65.
- Pedersen, S., Sällvik, K., 2002. Heat and moisture production at animal and house levels. CIGR, 4th Report of working group on Climatization of Animal Houses.
- Rojano, F., Bournet, P.E., Hassouna, M., Robin, P., Kacira, M., Choi, C.Y., 2015. Modelling heat and mass transfer of a broiler house using computational fluid dynamics. *Bio-systems engineering*, 136, 25-38.
- Seo, I.H., et al., 2008. Development of a CFD model to study ventilation efficiency of mechanically ventilated pig house
- Statistics Korea, 2021. Number of households and animal by region and breeding size of chickens (retrieved 2021.08.20.)
- Wilson, D.J., Gabriel, E., Leatherbarrow, A.J., Cheesbrough, J., Gee, S., Bolton, E., Diggle, P.J., 2008. Tracing the source of campylobacteriosis. *PLoS genetics*, 4(9), e1000203.