



BES 기법을 이용한 육계사 내부 고온 스트레스 평가를 위한 THI 지수 모의

Estimation of THI Index to Evaluate Thermal Stress of Animal-occupied Zone in a Broiler House Using BES Method

하태환* · 권경석**·† · 홍세운*** · 최희철** · 이준엽** · 이동현** · 우샘이** · 양가영** · 김락우* · 여욱현* · 이상연* · 이인복*

Ha, Taehwan · Kwon, Kyeong-seok · Hong, Se-woon · Choi, Hee-chul · Lee, Jun-yeob · Lee, Dong-hyun · Woo, Saemee · Yang, Ka-young · Kim, Rack-woo · Yeo, Uk-hyeon · Lee, Sangyeon · Lee, In-bok

Abstract

Thermal stress of livestock has been issued due to recent climate change trends and this causes reproductive disorders, decreased feed consumption, immunosuppression, and increased mortality of animals. Concept of THI has been widely used to quantitatively evaluate the degree of thermal stress for animals, however use of this concept is restricted for animals living in the enclosed facilities such as mechanically ventilated broiler houses. In this study, time-based internal energy flow and variation trends of temperature and humidity were analyzed based on BES technique. Local weather data, insulation characteristics of building materials, heat and moisture generation rate from broilers according to age, algorithm of ventilation operation were adopted for boundary condition of the model to accurately compute THI values inside the mechanically ventilated broiler house. From the BES computation, excess frequency of THI threshold in Jeju city was highest on the assumption that air conditioning equipments were not installed. When general raising density (39 kg m⁻²) was adopted, total 2,191 hours were exceeded. Excess hours of THI threshold were strongly related to the cumulative air temperature (R²=0.87).

Keywords: BES; broiler house; cooling load; thermal stress; THI

1. 서론

축산시설 내 가축은 권장 온도보다 높은 생육 환경이 조성될 경우 생리적으로 음수량을 증가시키는 반면 사료를 덜 섭취하게 되며, 이에 따라 번식 장애를 보이거나 심한 경우 폐사에 이를 수 있다(Bonnet et al., 1997; Zerjal et al., 2013). 최근 국내 폭염 발생 빈도 증가로 인하여 2012년 1,857천 마리(닭 1,766천수, 오리 79천수, 메추리 11천수, 돼지 727두, 소 33두)에서 2016년 4,180천 마리(닭 3,954천수, 오리 147천수, 메추리 70천수, 돼지 8.4천두, 2016년 9월 기준) 규모의 가축

피해가 보고되었다(NIAS, 2016). 이 중 가금류는 몸 전체가 깃털로 덮여 있고 땀샘이 발달하지 않아 소와 같은 대동물에 대비하여 체온 조절이 용이하지 않다. 폭염에 의해 고온 스트레스가 발생하면 사료 섭취량 감소, 계란 생산량 및 품질 저하, 고온 노출에 따른 백혈구 수 감소, 항체 생산 억제, 림프구 수 감소 등으로 인한 면역기능 저하 및 폐사율 증가 등으로 그 피해 규모는 매우 크다고 보고되고 있다(Bonnet et al., 1997; AL-Saffar and Rose, 2002; Marshaly et al., 2004; Franco-Jimenez et al., 2007; Rozenboim et al., 2007; Oguntunji and Alabi, 2010; Tumova and Gous, 2012; Lala and Rostagno, 2013; Zerjal et al., 2013).

NRC (1971) 및 Dikmen and Hansen (2009)은 고온에 따른 가축의 열 스트레스 지수 산정을 위하여 기온과 상대습도를 이용한 THI (THI; Temperature-humidity index) 지수를 제시하였다. St-Pierre et al. (2003)는 미국 내 고온 스트레스에 따른 축종별 경제적 피해 규모를 추정하기 위하여 THI 지수 산정을 실시하였으며, 고온 스트레스로 인하여 가축의 생산성이 하락하기 시작하는 임계점에 대하여 젖소의 경우 70, 육우 75, 모돈, 74, 비육돈 72, 육계 78, 산란계 70 등으로 제시한 바 있다. 또한 Bouraoui et al. (2002), Collier et al. (2011)

* Department of Rural Systems Engineering, 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

*** Food, Agricultural and Biological Engineering, The Ohio State University

† Corresponding author

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

E-mail: kskwon0512@korea.kr

Received: September 27, 2017

Revised: January 8, 2018

Accepted: January 8, 2018

은 THI 지수에 따른 젖소의 우유 생산량 관계를 분석하였고, Vitali et al. (2009)는 THI 지수에 따른 젖소의 폐사율 분석을 실시하였다. 국내의 경우 국립축산과학원 (2016)에서 IPCC의 RCP 시나리오에 따른 외부 기온 및 습도 변화를 고려하여 젖소, 돼지, 육계, 산란계 등 축종별 미래 THI 지수 예측을 수행한 바 있다. 그러나 자연환기를 주로 실시하는 젖소 등과 달리 닭의 경우 주로 무창, 반무창 시설에서 사육을 실시하기 때문에 시설 외부의 기온 및 상대습도에 기반한 THI 지수 산정 및 폭염 대책 마련에는 한계가 있다. 따라서 외기 변화에 따른 사육 시설 내부의 기온 및 습도 등과 같은 환경 변화를 고려한 THI 지수 산정이 필수적으로 요구되며 이를 통한 정밀 생육 환경 관리 및 가축의 고온 스트레스 관련 지역별 세분화된 폭염 대책 마련이 수반되어야 한다.

한편, 농업 시설물 내부의 에너지 흐름 모의 및 부하 산정을 위하여 정적 에너지해석 또는 동적 에너지해석 기법이 이용되고 있다. 정적 에너지해석 기법은 주로 극한 상황에서의 최대 에너지 부하를 추정하기 위하여 많이 이용되며 동적 에너지해석 기법은 시간에 따른 주변 환경의 변화를 고려하여 에너지의 유·출입을 모의하는데 많이 이용된다. 따라서 시간 및 외부 변수에 따른 계산 온도 및 습도 등과 같은 내부 환경 변화를 모의하기 위해서 동적 에너지해석 기법을 적용하는 것이 적절하며 이에 따라 최근 Hong et al. (2008), Jang et al. (2009), Alvarez-Sánchez et al. (2014), Ha et al. (2015)은 동적 에너지해석 기법에 기반하여 농업 시설물의 BES (Building Energy Simulation) 해석을 수행한 바 있다.

이에 본 논문에서는 강제환기식 무창 육계사를 대상으로 BES 기법을 이용하여 시설 내부 에너지 흐름을 동적으로 모의하여 시설 내부 온도 및 습도를 계산하고 THI 지수 산출을 통하여 국내 주요 지역별 육계의 고온 스트레스 노출 위험 정도를 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 대상 지역

육계 사육 시설 내부 THI 지수 산출을 위한 연구 대상 지역 선정을 위하여 국내 주요 행정구역별 각 구역 내 육계 사육 수 수가 가장 많은 시군을 조사하였다. 2015년 통계청 자료를 토대로 안성시 (182만수, 경기도), 춘천시 (87만수, 강원도), 제천시 (127만수, 충청북도), 부여군 (401만수, 충청남도), 익산시 (265만수, 전라북도), 영암군 (188만수, 전라남도), 상주시 (176만수, 경상북도), 창녕군 (146만수, 경상남도), 제주시 (142만수, 제주도)를 선정하였다 (Statistics Korea, 2017) (Fig. 1).

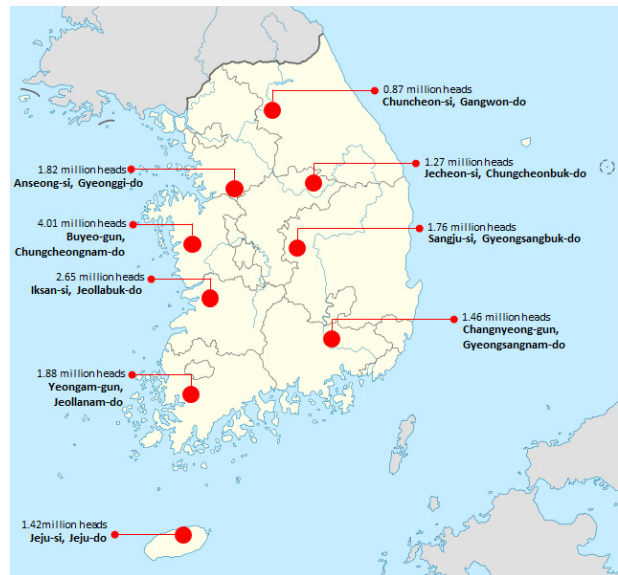


Fig. 1 Research area for each administrative district to evaluate THI index within broiler house

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

Research area	Selected weather station for acquiring weather data	
	Temperature, relative humidity, atmosphere pressure	Solar radiation
Anseong, Gyeonggi-do	Cheonan	Cheongju
Chuncheon, Gangwon-do	Chuncheon	
Jecheon, Chungcheongbuk-do	Jecheon	Wonju
Buyeo, Chungcheongnam-do	Buyeo	Daejeon
Iksan, Jeollabuk-do	Jeonju	
Yeongam, Jeollanam-do	Gangjin	
Sangju, Gyeongsangbuk-do	Sangju	Andong
Changnyeong, Gyeongsangnam-do	Uiryeong	
Jeju, Jeju-do	Jeju	

각 대상 지역 소재 육계사에 대한 BES 해석 모델 설계를 위하여 기상청에서 제공하는 2016년 온도, 습도, 일사량, 지면 온도 등의 기상 자료를 입력 자료로 구축하였다. 연구 대상 지역에 가장 인접한 기상 관측소의 자료를 이용하고자 하였다 (Table 1).

2. 실험 대상 시설

연구 대상시설은 2016년 농림축산식품부에서 발간한 축사 표준설계도 중 육계 사육시설을 기준으로 선정하였다(MAFRA, 2016). 해당 시설은 무창 계사 형태로 폭 14.0 m, 측고 3.3 m, 동고 5.4 m, 길이 114.0 m이며 총 길이 중 출입구 인근 3.0 m는 전실, 이후 111.0 m 길이가 사육 공간에 해당한다(Fig. 2).

육계사 표준설계도(MAFRA, 2016)는 벽체 및 지붕에 대하여 각각 두께 100 mm, 150 mm의 샌드위치 판넬을 이용하여 시공할 것을 고시하고 있으며, 바닥면은 두께 150 mm로 잡석 다짐 후 방습필름을 설치하고 버림콘크리트 50 mm, 철근콘크리트 200 mm를 시공할 것을 제시하고 있다. 표준설계도에서 고시된 벽체, 지붕 및 바닥 시공법을 기준으로 연구 대상 육계사 BES 해석 모델을 설계하였으며 이때 입력 자료로

활용된 자재 물성치는 다음과 같다 (Table 2).

3. THI (Temperature-humidity) 지수

NRC (1971) 및 Dikmen and Hansen (2009)은 온도 및 상대습도를 이용하여 젖소, 돼지, 육계, 산란계 등과 같이 축종별 고온 스트레스를 평가하기 위한 THI 지수를 제시하였으며 육계의 THI 지수 산정식은 다음과 같다.

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

여기서, RH 는 육계사 내부 상대습도(%), T 는 육계사 내부 온도($^{\circ}C$)이다.

상기 수식을 이용하여 각 지역별 시간에 따른 시설 내부 온도 및 상대습도 변화를 모의하고 이를 통하여 THI 지수를 산출하였다. 육계가 고온 스트레스를 받는 한계 THI 지수 값으로 St-Pierre et al. (2003)의 연구 결과에 의거하여 78을 설정하였다.

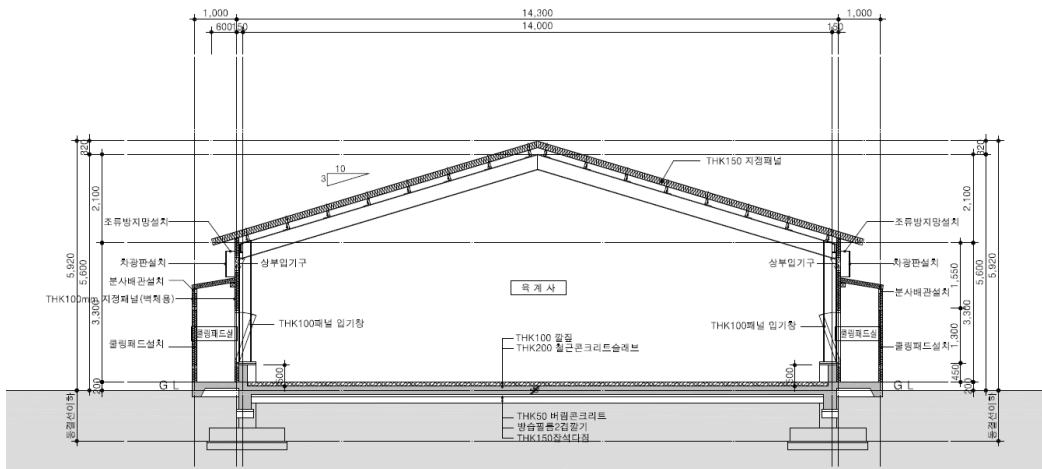


Fig. 2 Standard design of broiler house published by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (2016)

Table 2 Physical properties of the materials used in broiler house

Materials	Conductivity ($\text{kJ h}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Thermal capacity ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	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

4. BES (Building Energy Simulation)

BES 기법은 건축물의 열, 에너지 흐름을 수치 해석적으로 계산하고 모의하는 기술로써 높은 정확도와 활용성으로 일반 건축분야에서 널리 사용되고 있으며 최근 농업분야에서도 농업시설의 에너지 분석을 위해 이용되고 있다. 다양한 BES 해석 툴 중 TRNSYS (TESS, LLC., USA)는 시간 흐름에 따른 태양 고도 변화와 관련한 전체 시스템의 동적인 시뮬레이션 및 설계를 위하여 개발된 툴로써 전달함수법에 근거하여 공간에서 발생하는 복잡한 열 취득과 관련되는 복사 및 대류 현상, 축열 및 방열 등을 고려한 열평형을 통하여 동적인 열 에너지에 대한 해석을 수행한다. TRNSYS는 모듈 기반 프로그램으로 연구자가 목적에 따라 각 모듈을 연결함으로써 연구 대상의 에너지 부하 및 시설 내부 환경 변화에 대한 모의가 가능하다. 에너지 평형 방정식을 기초로 벽체 표면에서 대류 및 전도에 의한 에너지 획득 및 손실, 환기에 의한 에너지 획득 및 손실, 침기로 인한 에너지 손실, 내부에 설치되어 있는 열원으로부터의 에너지 획득 및 손실 등을 전체적으로 고려하여 매 시간마다 대상 시설 내 열 에너지의 변화를 다음과 같이 계산한다 (Ha et al., 2015).

$$Q_i = Q_{surf} + Q_{vent} + Q_{gain} + Q_{inf} + Q_{cplg} + Q_{lat}$$

$$Q_{surf} = A_s \cdot (q_{c,s} + q_{r,s})$$

$$Q_{vent} = \rho \cdot C_p \cdot N_{vent} \cdot V \cdot (T_{out} - T_{in})$$

$$Q_{inf} = \rho \cdot C_p \cdot N_{inf} \cdot V \cdot (T_{out} - T_{in})$$

$$Q_{cplg} = \rho \cdot C_p \cdot N_{cplg} \cdot V \cdot (T_{zone,i} - T_{in})$$

$$Q_{lat} = h_v [m_{inf}(\omega_a - \omega_{req}) + m_{vent}(\omega_{vent} - \omega_{req}) + W_g + m_{cplg}(\omega_{zone,i} - \omega_{req}) - M_{eff} \frac{d\omega}{dt}]$$

$$q_{c,s} = h_{conv}(T_s - T_{in})$$

$$q_{r,s} = \sigma \cdot \epsilon_s (T_s^4 - T_{in}^4)$$

여기서, A_s 는 내부 표면적 (m^2), C_p 는 공기의 열용량 ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$), h_{conv} 는 대류 열전달계수 ($kJ \cdot hr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$), h_v 는 증발열 ($kJ \cdot kg^{-1}$), m 은 공기 질량 (kg), M_{eff} 는 대상 영역의 수분 용량, $N_{vent,inf}$ 는 환기 및 침기에 의한 공기교체율 (hr^{-1}), N_{cplg} 는 인접한 영역 i 와의 공기교체율 (hr^{-1}), Q_i 는 zone i 에서의 총 열손실 혹은 열획득 ($kJ \cdot hr^{-1}$), Q_{surf} 는 건물 표면에서의 열손실 혹은 열획득 ($kJ \cdot hr^{-1}$), Q_{vent} 는 환기를 통한 열손실 혹은 열획득 ($kJ \cdot hr^{-1}$), Q_{gain} 는 내부 인공물에 의한 열손실 혹은 열획득 ($kJ \cdot hr^{-1}$), Q_{inf} 는 침기에 의한 열손실 혹은 열획득 ($kJ \cdot hr^{-1}$), Q_{cplg} 는 인접한 zone과의 공기 교체를 통한 열손실 혹은 열획득 ($kJ \cdot hr^{-1}$), Q_{lat} 는 내부 잠열 발생에 의한 열손실 혹은 열획득

($kJ \cdot hr^{-1}$), $T_{in,out}$ 는 내부 및 외부 공기 온도 ($^\circ C$), T_s 는 표면 온도 ($^\circ C$), $T_{zone,i}$ 는 인접한 영역 i 의 내부 공기 온도 ($^\circ C$), V 는 내부 부피 (m^3), ϵ_s 는 장파방사율, ρ 는 공기의 밀도 ($kg \cdot m^{-3}$), ω_a 는 공기의 습도비, ω_{req} 는 기습 또는 제습을 위한 목표 습도비, $\omega_{zone,i}$ 는 인접한 영역 i 의 습도비, σ 는 스테판볼츠만 상수 ($kJ \cdot hr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^4$)이다.

5. 시뮬레이션 환경 조건

가. 닭 에너지 발생량

Pedersen and Sällvik (2002)이 제시하는 $20^\circ C$ 조건 시 닭 체중에 따른 에너지 발생량은 다음과 같다.

$$\phi_{tot} = 10.62 \times m^{0.75}$$

여기서 ϕ_{tot} 은 닭으로부터의 전체 에너지 발생량 (W)이며, m 은 닭의 체중 (kg)을 의미한다. 일령별 닭의 체중은 Yoo (2009)가 제시한 경험식을 활용하였다.

$$m = 1.1678 \times d^2 + 11.137 \times d + 35.753$$

여기서 d 는 닭의 일령 (days)을 의미한다.

Pedersen and Sällvik (2002)은 닭으로부터의 1,000 W의 단위 에너지가 발생했을 때 온도 변화에 따른 에너지 발생량에 대한 보정식을 다음과 같이 제시하였다.

온도 변화에 따른 닭으로부터의 에너지 발생량 보정 방법을 다음과 같이 제시하고 있다.

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

여기서 ϕ' 는 주변 온도에 따라 보정된 전체 에너지발생량 (W)이며, t 는 온도 ($^\circ C$)를 의미한다. 앞선 두 수식을 이용하여 여름 온도에 따른 닭 에너지 발생량 수식을 수정하고 이를 다시, 현열 (ϕ_s) 및 잠열 (ϕ_l) 발생량으로 구분하면 다음과 같다.

$$\phi_{tot} = \frac{10.62}{1000} \times m^{0.75} \times [1000 + 20 \times (20 - t)]$$

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

$$\phi_l = \phi_{tot} - \phi_s$$

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

상기 언급된 닭의 체중 및 주변 온도에 따른 현열 및 잠열 발생량 수식은 BES 해석 모델 내 실시간 닭으로부터의 에너지 발생량 자료를 계산하기 위한 경계조건으로 활용하였다.

나. 시뮬레이션 연산 조건

본 논문에서는 28일간 육계 사육을 실시하여 닭의 체중이 약 1.2~1.3 kg에 도달할 경우 출하를 실시하고 14일간 휴지기를 갖는다는 가정 하에 시뮬레이션 모델 설계 및 해석을 실시하였다. 모델의 입력 자료는 지역별 2016년 기상 자료 전체를 활용하되, 하절기 닭의 고온 스트레스 분석을 위하여 5월부터 9월까지의 기간에 대한 분석을 실시하였다. 해당 분석 기간의

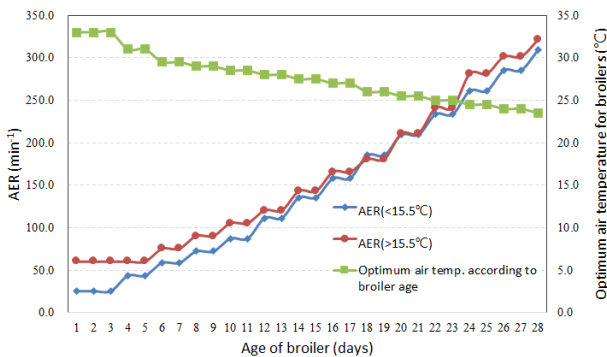


Fig. 3 Defined ventilation rate (AER; Air exchange rate per minute) and optimum air temperature according to broiler age when 35,000 heads of broilers were raised

경우 총 4회 출하, 3회 휴지기를 갖는 것으로 설정하였다 (Table 3).

육계사 환기 시스템은 일령별 내부 권장 온도에 따라 상이하게 가동되며 환기팬의 가동 시간을 조절함으로써 설계 환기량을 달성하는 방식을 취하고 있다. 본 논문에서는 국내 H계열사의 환기 운영 권장 프로그램을 토대로 일령별, 내·외부 환경 조건별 환기팬 가동 경계조건을 구축하였다 (Fig. 3).

BES 모델의 환기 운영은 일령별 설계 환기량을 기준으로 환기팬을 가동/중지하는 일종의 주기 운전을 기본으로 하되, 외부 기온 상승에 따라 시설 내부 온도가 설계 온도를 상회하는 경우, 실제 국내 육계 사육 농가의 환기 운영 상황을 고려하여 설계 온도 범위를 만족할 때까지 환기팬을 연속 가동하는 것으로 설정하였다. 단, 시뮬레이션 해석 시 침기에 의한 영향은 없으며 향후, 지역별 기후 조건에 따른 적정 냉방시스템 용량 산정을 목적으로 쿨링패드 등과 같은 냉방시설은 설치되어 있지 않다고 가정하였다.

실험 대상 육계사 내 사육수수는 일반적으로 국내에 적용되고 있는 사육 밀도 (39 kg m⁻³)를 고려하여 설계하였다. 축사 표준설계도 상 육계사의 사육 면적인 1,554 m²을 고려하여, 일반 사육 밀도 적용 시 45,000수 (출하 체중 및 사육 면적 고려 시 최대 47,397수 사육)가 사육된다고 가정하였으며 해당 사육수수에 대한 현열 및 잠열 발생량을 앞서 언급된 수식을 이용하여 경계조건에 반영하였다.

본 논문에서는 시설 내부에 존재하는 닭으로부터의 에너지 발생 및 벽체로부터의 열 획득 및 손실, 환기에 의한 열 손

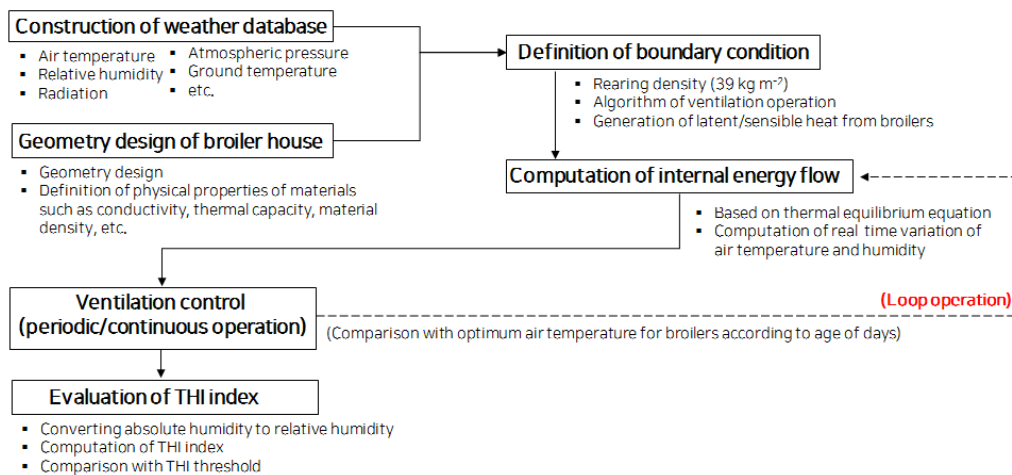


Fig. 4 Research flow to evaluate THI in broiler house using BES method

Table 3 Designed broiler rearing periods in the BES model

	Period 1	Period 2	Period 3	Period 4
Rearing periods	1. May~28. May	11. June~9. July	22. July~20. Aug.	4. Sep.~1. Oct.

실 등의 효과 등을 고려하여 실시간으로 변화하는 육계사 내부의 평균 기온 및 상대습도를 계산하였으며 도출된 자료를 이용하여 각 시간별 THI 지수를 산정하였다. 또한 본 논문을 통하여 산출한 THI 지수 결과를 이용하여 현행 육계사 THI 지수 산정 방법 (NIAS, 2016)과의 비교 분석을 실시하였다.

Fig. 4는 BES 모델을 이용한 육계사 내부 THI 지수 산정과 관련한 전체 연구 흐름을 도시하고 있다.

III. 결과 및 고찰

1. BES 모델을 이용하여 모의한 지역별 계사 내부 온도 및 상대습도

본 연구를 통하여 설계한 BES 육계사 모델을 이용하여 각 대상 지역의 외부 기온, 상대습도, 수평면 일사량 및 사육 밀도, 일령별 닭의 에너지 발생량 (현열, 잠열), 환기 운영 조건 등에 따라 시간별 육계사 내부의 온도 및 상대습도 변화를 동

적으로 모의하였다. Fig. 5는 BES 육계사 모델을 이용하여 모의한 경상남도 창녕군에 위치한 무창 육계사의 3차 사육시기 중 3주령 (15일령~21일령) 시 시간별 시설 내부 온도 및 상대습도 변화 결과 예시를 도시하고 있다. 육계사 내부 온도는 시간별 일사량 및 외부 온도 변화 양상과 유사하게 증가 및 감소 경향을 보여주고 있으며, 냉방장치가 설치되지 않았다는 가정 하에 시뮬레이션을 수행하였기 때문에 각 일령별 적정 사육 권장 온도 보다 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 내부 상대습도의 경우 시간별 외부 상대습도 변화 양상과 유사한 경향을 보이나, 외부 보다 낮은 값을 보이는 것으로 모의되었다.

일반적으로 고온 다습한 하절기 기후가 형성되는 7~8월경 계사 내부 온도가 상대적으로 높게 형성되는 것으로 모의되었으며 1~2차 사육기간의 경우 경상북도 상주시, 3~4차 사육기간은 제주시의 기상자료를 이용하였을 때 무창 계사에서 가장 높은 내부 기온이 형성되는 것으로 나타났다 (Table 4). 쿨링패드 등과 같은 냉방시설이 설치되어 있지 않다는 가정 하의 모의 결과, 제주시의 기상자료를 이용하였을 경우 3차

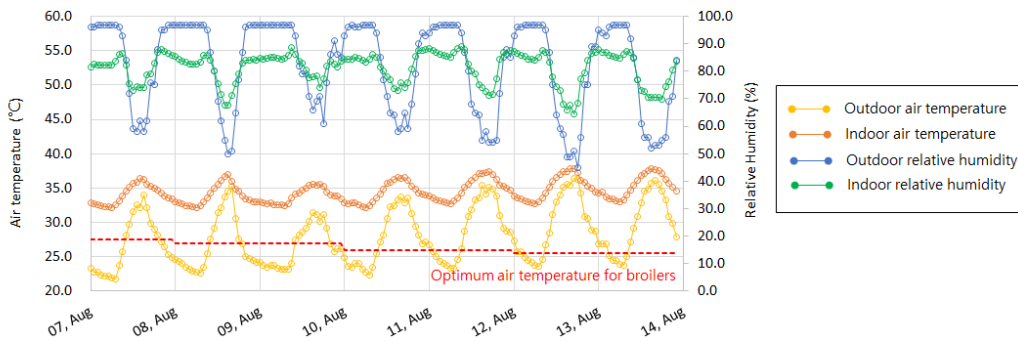


Fig. 5 BES computed internal air temperature and relative humidity trends (7~14, August, 2016, Changnyeong, Gyeongsangnam-do)

Table 4 BES computed air temperature and relative humidity in the broiler house according to rearing periods and research area

Research area	Period 1 1. ~ 28. May		Period 2 11. June. ~ 9. July		Period 3 22. July~20. Aug.		Period 4 4. Sep.~1. Oct.	
	Ave. Temp. (°C)	Ave. R.H. (%)	Ave. Temp. (°C)	Ave. R.H. (%)	Ave. Temp. (°C)	Ave. R.H. (%)	Ave. Temp. (°C)	Ave. R.H. (%)
Anseong	27.4	61.0	29.8	70.6	31.8	73.0	28.4	71.7
Chuncheon	27.7	64.1	29.9	71.5	32.2	77.4	28.5	72.6
Jecheon	26.9	61.7	29.5	67.5	31.6	70.9	28.0	70.0
Buyeo	27.7	66.9	30.0	74.5	32.6	73.4	28.8	71.0
Iksan	27.8	65.2	30.0	76.6	32.5	73.9	29.1	72.2
Yeongam	27.3	70.0	29.6	80.1	32.2	77.0	29.0	76.8
Sangju	27.9	57.6	30.3	66.2	32.6	67.0	28.5	73.1
Changnyeong	27.2	68.7	29.6	77.3	31.9	76.3	28.3	78.7
Jeju	27.5	67.6	30.1	76.9	32.9	73.0	29.7	73.9

Ave. : Average / R.H. : Relative humidity / Temp. : Temperature

사육기간 중 내부 평균 온도는 32.9 °C, 평균 상대습도는 73.0 % 수준을 보이는 것으로 나타났다.

지역별 BES 육계 모델 시뮬레이션 해석 대상 기간 중 시설 내부 최고 온도 및 해당 값의 발생 시점, 당시 내부 상대습도 등은 Table 5와 같다. 예를 들어 전라북도 익산시의 기상자료를 이용하였을 경우 2016년 8월 20일 (28일령 조건 시) 오후 3시경 내부 온도 37.2 °C로 가장 높은 열 환경을 띄는 것으로 모의되었으며 28일령에 대한 적정 사육 온도 기준인 23.5 °C 대비 13.7 °C를 초과하는 것으로 나타났다. 전체적인 BES 모델 해석 결과를 검토할 경우, 예상되는 내부 열환경에 대하여 지역별 냉방 시스템의 설비가 필수적인 것으로 판단되었다.

육계 사육 시설의 지역별 냉방 시스템 용량을 결정하기 위한 기초 자료 제공을 위하여, 사육기간 동안 각 시간별 육계사 내부 열환경을 적정 사육 수준으로 달성하기 위한 냉방부하 값을

을 모의하였다. Table 6은 본 논문을 통하여 도출한 각 지역별 최대 냉방부하 및 기간 냉방부하 값 (MJ hr⁻¹)을 도시하고 있다. 전체 사육기간 중 가장 높은 내부 온도를 보인 경상북도 상주시의 기상자료를 이용하였을 경우, 최대 냉방부하가 1,452.2 MJ hr⁻¹로 도출되었다. 그러나 상주시보다 상대적으로 낮은 최고 온도 값을 보인 충청남도 부여군에서 더 높은 최대 냉방부하 값 (1533.7 MJ hr⁻¹)이 도출되었는데, 이는 육계사 내부 최대 온도 발생 시점 (일령)이 서로 상이하여 부여군의 내부 기온 및 적정 사육 권장 온도 간 차이가 상주시보다 0.4 °C 가량 높았기 때문으로 판단된다.

2. 한계 THI 초과일 및 시간

총 4회 사육이 실시된다고 가정된 연구 대상 기간 (112일, 2,688시간)에 대하여 BES 모델을 이용한 시간별 육계사 내부

Table 5 BES computed occurrence time of highest air temperature according to research area.

Research area	Occurrence time of highest air Temp. (°C)	Age of broilers	Opt. air Temp. (°C)	Temp. (°C)	Relative humidity (%)
Anseong	2016-08-20 17:00	28	23,5	36,5	53,2
Chuncheon	2016-08-12 16:00	20	25,5	36,9	60,2
Jecheon	2016-08-20 15:00	28	23,5	36,5	40,8
Buyeo	2016-08-20 17:00	28	23,5	37,3	51,5
Iksan	2016-08-20 15:00	28	23,5	37,2	56,4
Yeongam	2016-08-13 15:00	21	25,5	37,1	56,1
Sangju	2016-08-19 13:00	27	24,0	37,4	47,2
Changnyeong	2016-08-12 17:00	20	25,5	37,3	56,7
Jeju	2016-08-14 15:00	22	25,0	36,3	66,7

Opt. : Optimum / Temp. : Temperature

Table 6 BES computed maximum and periodic cooling loads of the broiler house according to rearing periods and research area

Research area	Period 1 1. ~ 28. May		Period 2 11. June. ~ 9. July		Period 3 22. July~20. Aug.		Period 4 4. Sep.~1. Oct.	
	Max. (MJ hr ⁻¹)	Period. (MJ hr ⁻¹)	Max. (MJ hr ⁻¹)	Period. (MJ hr ⁻¹)	Max. (MJ hr ⁻¹)	Period. (MJ hr ⁻¹)	Max. (MJ hr ⁻¹)	Period. (MJ hr ⁻¹)
Anseong	1,094.1	158,959.0	1,336.7	231,018.8	1,463.3	295,302.3	854.5	168,363.8
Chuncheon	1,222.6	170,531.7	1,418.3	229,338.9	1,427.8	305,248.7	977.5	173,114.5
Jecheon	1,121.7	145,668.4	1,339.3	217,254.7	1,480.3	284,890.2	891.9	152,511.8
Buyeo	1,121.6	166,984.6	1,449.3	235,991.7	1,533.7	329,753.6	859.4	180,284.8
Iksan	1,095.9	176,709.9	1,337.4	241,124.1	1,530.4	317,618.9	964.2	194,909.6
Yeongam	989.4	160,696.0	1,277.4	229,635.6	1,396.6	302,997.1	955.0	190,526.5
Sangju	1,227.7	178,344.9	1,404.1	247,139.2	1,452.2	319,366.7	860.4	171,141.3
Changnyeong	1,058.4	151,459.2	1,371.7	224,803.9	1,437.6	296,730.2	862.6	163,706.1
Jeju	849.2	163,143.6	1,179.6	252,904.2	1,299.7	328,000.7	1000.3	220,441.2

Max. : Maximum cooling load / Period. : Periodic cooling load

공기 온도 및 상대습도 산출 결과를 토대로 THI 지수를 계산하였다. 또한 육계가 고온 스트레스를 받기 시작하는 한계 THI 지수 값(78)을 기준으로 대상 기간 중 초과 기간에 대한 분석을 실시하였다. Fig. 6은 경상남도 창원군의 기상자료를 이용하여 모의된 육계사 내부 온도와 습도 자료를 이용하여 3차 사육시기 중 3주령(15~21일령) 시 시간별 THI 지수 계산 결과이다.

9개 대상 지역 중 한계 THI 지수를 초과하는 시간은 제주 시, 영암군, 익산시, 부여군, 창원군, 춘천시, 상주시, 안성시, 제천시 순으로 높은 것으로 나타났으며 전체 사육시간과 비교하여 각각 81.5%, 80.0%, 78.9%, 75.6%, 74.9%, 74.2%, 71.9%, 69.8%, 64.9%를 차지하고 있는 것으로 나타났다 (Table 7). 이는 무창육계사에서 사육되는 닭은 쿨링패드 등과

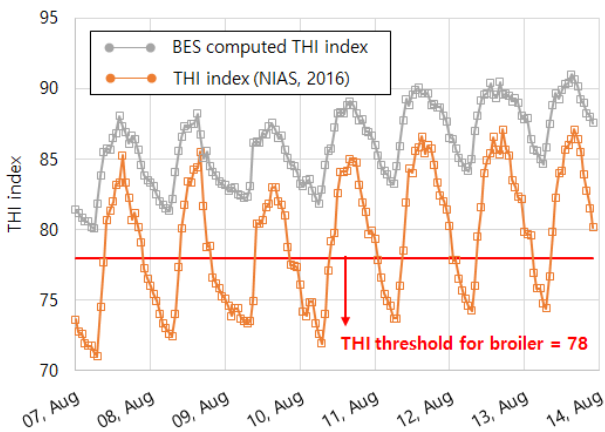


Fig. 6 Comparison of BES computed THI index and THI index of NIAS (2016) u (7~14, August, 2016, Changnyeong, Gyeongsangnam-do)

같은 냉방시설이 설치되지 않을 경우 하절기 사육기간 중 절반 이상의 기간동안 고온 스트레스를 겪을 수 있음을 의미한다.

한계 THI 지수를 가장 많이 초과하는 것으로 나타난 제주 시의 경우 1시간 단위 시간별 외부기온의 적산온도는 64,726 °C로 모의를 진행한 9개 지역 중 가장 높은 것으로 나타났으며 적산일사량은 1,934.7 MJ m⁻² 로 9개 지역 중에서 4번째로 높게 관측되었다. 전체 지역에 대한 한계 THI 지수 초과 시간 (Hour) 및 초과일 (Days)은 1시간 단위 시간별 적산온도에 대하여 선형적으로 증가 (R²=0.87, 0.55)하는 경향을 보였으나 적산일사량의 경우 크게 두드러진 경향 (R²=0.02, 0.02)을 보이지는 않는 것으로 나타났다.

육계 사육 시설에 쿨링패드 등과 같은 냉방장치가 미설치될 경우 2016년 기상 자료 기준, 연구대상 9개 지역 대부분의 육계가 하절기 내내 고온 스트레스를 느낄 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 국내 다수의 농가가 고비용의 쿨링패드 설치 문제, 가동 시 쿨링패드 주변 깔짚의 수분 조절 문제 등을 이유로 설치하지 않거나 설치하더라도 가동하지 않는 경우가 있어 실제 닭의 고온 스트레스가 발생할 것으로 판단된다.

가축사육정보시스템 (NIAS, 2016)을 통하여 현행 제공되고 있는 THI 지수 산정법, 즉 외부 기상 자료에 근거한 THI 지수 산정의 경우, 제주시의 한계 THI 지수 초과 시간 및 초과일은 각각 785시간, 45일로 BES 모델을 이용하여 도출한 무창육계사 내부의 온도 및 습도 자료를 이용하여 계산한 THI 지수 초과 시간 및 초과일 대비 각각 35.8%, 40.5%로 나타났다. 제주시를 제외한 나머지 대상 지역 또한 한계 THI 지수를 초과하는 시간 및 초과일이 각각 평균적으로 23.7%, 36.2%인 것으로 도출되어 닭의 고온 스트레스 발생 가능성에 대해서 과소평가하는 것으로 판단되었다 (Table 7).

Table 7 Hours and days over THI threshold based on BES and NIAS methods and cumulative ambient air temperature and outdoor radiation

Research area	BES method		NIAS (2016)		Cumulative air Temp. (°C)	Cumulative radiation (MJ m ⁻²)
	Hours over THI threshold	Days over THI threshold	Hours over THI threshold	Days over THI threshold		
Anseong	1,877	108	384	36	60,035.0	1,897.3
Chuncheon	1,995	111	503	40	61,318.8	1,829.5
Jecheon	1,745	107	288	32	58,076.0	1,840.7
Buyeo	2,032	111	514	41	61,646.7	2,208.5
Iksan	2,122	111	621	41	63,128.9	2,070.5
Yeongam	2,151	110	557	43	61,752.4	1,157.6
Sangju	1,933	108	473	44	63,014.5	2,014.6
Changnyeong	2,012	109	456	40	59,070.6	1,930.9
Jeju	2,191	111	785	45	64,726.3	1,934.7

Temp. : Temperature / RH : relative humidity

IV. 결 론

본 논문에서는 BES 기법을 활용하여 국내 9개 행정구역별 무창 계사 내부의 시간별 온도 및 습도 변화를 모의하고 닭의 고온 스트레스를 정량적으로 평가하기 위하여 THI 지수를 산정하고자 하였다. 한·육우사 및 젖소 사육 시설의 경우 대부분 외부 환경에 노출되어 있기 때문에 외부의 온도 및 상대습도 자료를 이용하여 THI 지수를 산정하고, 가축의 고온 스트레스 발생을 평가하는데 큰 문제가 없다. 그러나 돈사 및 계사 등과 같은 무창 사육 시설의 경우 외부 기상환경에 직접적으로 노출되지 않기 때문에 외부의 기상 자료를 이용하여 시설 내부 가축의 고온 스트레스를 유추하는 것은 많은 한계가 존재한다. 실제로, 대상지역의 외부 기온 및 상대습도 자료를 이용하여 THI 지수를 모의하는 현행 방법을 적용하여 THI 지수 한계 값에 대한 초과 시간 및 초과 일을 도출할 경우, BES 기법을 이용하여 계산한 값 대비 각각 25.1%, 36.7%로 과소평가하고 있음을 확인하였다. 따라서, 육계사와 같은 무창 사육 시설의 경우 본 연구와 같이, 시설의 밀폐 여부, 벽체의 단열 특성, 시설 내부 가축의 발열 특성, 환기 특성 등을 복합적으로 고려하여 고온 스트레스를 평가할 필요가 있다고 판단할 수 있다.

농업시설의 냉·난방 시스템의 규모를 결정하는데 있어 주로 최대 냉·난방 부하의 크기 및 안전율 등을 고려하여 설계하는 경우가 대다수이며 그로 인하여 시스템이 과다 설계되는 경우가 많다. 본 논문을 통하여 설계한 BES 육계사 모델로부터 도출한 하절기 THI 지수 발생 빈도 및 향후 연구를 통하여 도출하게 되는 최대 및 기간 냉방부하 자료를 토대로 향후 육계사의 쿨링패드 등과 같은 냉방 시스템의 설계 용량 선정에 있어 지역별, 기후 조건별 세분화된 설계 지침을 제공할 수 있을 것이라 판단된다. 또한 미래 기후변화 시나리오 등에 따라 향후 지역별 시설 내부의 환경 변화를 미리 예측하고 가축의 고온 스트레스 발생에 대비한 중장기적인 대안을 마련하는데 본 논문의 방법론이 활발히 적용될 수 있을 것이라 기대된다.

REFERENCES

1. AL-Saffar, A. A., and S. P. Rose, 2002. Ambient temperature and the egg laying characteristics of laying fowl. *World's Poultry Science Journal*. 58: 317-331. doi:10.1079/WPS20020025
2. 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

3. Bonnet, S., P. A. Geraert, M. Lessire, B. Carre, and S. Guillaumin, 1997. Effect of high ambient temperature on feed digestibility in broilers. *Poultry Science*. 76(6): 857-863.
4. Bouraoui, R., M. Lahmar, A. Majdoub, M. N. Djemali, and R. Belyea, 2002. The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. *Animal Research*, 51(6): 479-491. doi:10.1051/animres:2002036
5. Collier, R. J., R. B. Zimbelman, R. P. Rhoads, M. L. Rhoads, and L. H. Baumgard, 2011. A re-evaluation of the impact of temperature humidity index (THI) and black globe humidity index (BGHI) on milk production in high producing dairy cows. In Western Dairy Management Conf. Reno, NV. USA (pp. 113-125).
6. 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
7. Franco-Jimenez, D. J., S. E. Scheideler, R. J. Kittok, T. M. Brown-Brandl, L. R. Robeson, H. Taira, and M. M. Beck, 2007. Differential effects of heat stress in three strains of laying hens. *Poultry Science*. 16(4): 628-634.
8. 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
9. 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
10. 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.
11. Lara, L. J., and M. H. Rostagno, 2013. Impact of heat stress on poultry production. *Animals*. 3(2): 356-369. doi:10.3390/ani3020356
12. MAFRA, 2016. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
13. Mashaly, M. M., G. L. Hendricks, III, M. A. Kalama, A. E. Gehad, A. O. Abbas, and P. H. Patterson, 2004. Effect of heat stress on production parameters and immune responses of commercial laying hens. *Poultry Science*. 83(6): 889-894.
14. NIAS, 2016. National Institute of Animal Science. <http://nias.go.kr>. Accessed 10. May. 2017.
15. NIAS, 2016. *Report of development of livestock adaptation tool for climate change*. National Institute of Animal Science.

16. NRC, 1971. *A guide to environmental research on animals*. National Academy of Sciences.
17. Oguntunji, A. O., and O. M. Alabi, 2010. Influence of high environmental temperature on egg production and shell quality: a review. *World's Poultry Science Journal*. 66: 739-750. doi: 10.1017/S004393391000070X
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. Rozenboim, I., E. Tako, O. Gal-Garber, J. A. Proudman, and Z. Uni, 2007. The effect of heat stress on ovarian function of laying hens. *Poultry Science*. 86(8): 1760-1765.
20. 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.
21. Statistics Korea, 2017. <http://www.kosta.go.kr>. Accessed 15. April. 2017. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)74040-5
22. Tumova, E., and R. M. Gpus, 2012. Interaction of hen production type, age, and temperature on laying pattern and egg quality. *Poultry Science*. 91(5): 1269-1275. doi:10.3382/ps.2011-01951
23. Vitali, A., M. Semnalini, L. Bertocchi, U. Bernabucci, A. Nardone, and N. Lacetera, 2009. Seasonal pattern of mortality and relationships between mortality and temperature-humidity index in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 92(8): 3781-3790. doi:10.3168/jds.2009-2127
24. Yoo, J. S., 2009. New feeding and management for the production of poultry farming.
25. Zerjal, T., D. Gourichon, B. Rivet, and A. Bordas, 2013. Performance comparison of laying hens segregating for the frizzle gene under thermoneutral and high ambient temperatures. *Poultry Science*. 92(6): 1474-1485. doi:10.3382/ps.2012-02840