강제 환기식 육계사 다중 입기 슬롯에서의 입기류 도달거리 분석

Analysis of Jet-drop Distance from the Multi Opening Slots of Forced-ventilation Broiler House

권경석* · 하태환* · 이인복*[†] · 홍세운* · 서일환* · Jessie P. Bitog*

Kwon, Kyeong-seok · Ha, Tae-hwan · Lee, In-bok · Hong, Se-woon · Seo, Il-hwan · Jessie, P. Bitog

ABSTRACT

In the winter season, when the ventilation system is operating, the fresh cold air from the slot-type openings of broiler house which directly reached the animal zone can cause various problems such as thermal stress, decreasing of feed and water consumption, occurrence of respiratory disease, and etc. Therefore it is very important to control the trajectory of aero-flow from the slot openings to induce an efficient thermal heat change. Jet-drop distance model was proposed to predict and control the jet-trajectory. However their study was restricted due to the small scaled model and difficulties of measuring the Jet-drop distance. In this study, CFD was applied to analyze qualitatively and quantitatively the jet-drop distance in a real broiler house. The various variables were considered such as installed slot-angle, designed ventilation rate, and the outdoor ambient temperature. From the present study, two linear-regression models using the Jet-drop factor and corrected Archimedes number, and their R-squared values 0.744 and 0.736, respectively, were used. From this study, the applicability of CFD on the analysis of Jet-drop distance model was confirmed.

Keywords: Archimedes number; Broiler house; CFD; Jet-drop distance; Ventilation

1. 서 론

생활수준의 향상 및 식도락의 변화에 따라 국내 육류 소비량이 꾸준히 증가하고 있는 가운데 양계 산업 또한 국내 농·축산업 분야 중 약 26 % 정도의 높은 비중을 차지하고 있다 (통계청, 2011년). ‘규모의 경제’ 논리에 따라 시설 규모는 점차 대형화 되어가고 있으며 고밀도의 밀집 사육을 실시하여 축산물의 생산력 증대 및 가격 경쟁력 제고를 도모하고 있다. 이에 따라 동물군의 최적 환경 조성의 중요성이 대두되면서 적합한 시설 환경 마련이 더욱 요구되고 있으나 적정 환기 및 내부 환경 요소의 유지가 쉽지 않아 육계의 생산성 향상에 많은 어려움이 산재하고 있다 (Park et al., 2004, Hong et al., 2008).

현재 국내 대다수의 육계사의 환기 방식은 하절기의 경우 터널 환기 방식을, 환절기 및 동절기의 경우 측벽에 설치된 배기 팬 및 다수의 입기 슬롯을 이용한 크로스 환기 방식으로 운영되고 있다. 그러나 동절기에 환기를 실시할 경우 상대적으로 밀도가

높은 차가운 외기가 그대로 계군으로 도달하여 계군의 열적 스트레스를 유발할 수 있다. 이는 각종 호흡기성 질병의 원인으로 작용할 뿐만 아니라 이로 인한 닭의 쏠림 현상, 사료 섭취량 및 음수량의 감소, 면역력 저하, 폐사율 증대에 따른 다양한 경제적 손실을 야기시킬 수 있다. 따라서 차가운 외기가 그대로 계군 내로 도달하지 않고 최대한 시설 내부 상단에서 존재하는 따뜻한 공기층과 열교환이 이루어지도록 입기류를 유도하는 것이 중요하다. 이에 Zhang 등 (1996, 1999)은 실험실 규모의 소규모 축산 시설 모형을 대상으로 공간으로 유입되는 외기류의 궤적 조절에 대한 기준 마련을 위하여 아르키메데스 수 등을 이용한 입기류 도달거리 (Jet-drop distance) 모델을 제시한 바 있다. Zhang 등에 따르면 입기구로부터 유입되는 차가운 공기는 공기 자체가 보유하고 있는 열 에너지, 시설 내부 온도, 입기류의 유입 각도, 입기구 인근에 형성되는 압력 차, 입기구의 수리학적 형상 등 다양한 요인의 영향을 받는다. 이에 Zhang 등은 실험실 규모에서 입기 슬롯의 유입 각도 (25, 90도), 입기구 높이, 내·외부 온도 차 등을 실험 변수로 입기 슬롯으로부터의 도달거리를 측정하였으며 아르키메데스 수, Jet-drop factor, 수정 아르키메데스 수 등 다양한 변인과 도달거리 간의 상관관계를 도출하였다. 그러나 도달거리 산정 시 이를 정성적 및 정량적으로 평가하기 어려우며 측정 및 판단에 연구자의 주관성이 관여되었던 점, 내부 공기 유동의 변동 정도에 따른 데이터의 안정성 문제 등

* 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 & 농업생명과학 연구원

[†] Corresponding author Tel.: +82-2-880-4586
Fax: +82-2-873-2087
E-mail: iblee@snu.ac.kr

2012년 1월 16일 투고

2012년 2월 16일 심사완료

2012년 3월 6일 게재확정

다양한 한계가 지적된 바 있다. 또한 Zhang 등 (1996, 1999)은 입기 슬롯의 개수가 1개, 3개에 국한되는 등 실제 육계사 환기 운영 연구에 적용하기에는 부족하다.

이에 본 연구에서는 최근 농업 시설의 환기 연구에 활발히 적용되고 있는 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 기술을 활용하여 Lee 등 (2007)에 의하여 검증된 크로스 강제 환기 방식의 육계사 시뮬레이션 모델을 대상으로 다중 입기 슬롯에서의 입기류 도달거리를 측정하고 이에 대한 특성을 파악하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. Jet-drop distance model

환기가 이루어지는 대상 공간으로 유입되는 기류의 궤적을 파악하기 위하여 아르키메데스 수 (Archimedes Number, Ar) 및 수정 아르키메데스 수 (Corrected Archimedes Number, Ar_c) 등을 이용한 다양한 연구가 진행되었다. 그러나 각 연구자 (Randall and Battams, 1979, Leonard and McQuitty, 1986, Berckmans et al., 1993)의 현장실험에 따라 서로 다른 환경 및 실험 조건 등의 차이로 인하여 불명확하고 상이한 기준치를 제시하는 등 많은 한계가 존재하였다. 이에 Zhang 등 (1996, 1999)은 입기 슬롯으로부터 유입되는 기류의 궤적 조절 시스템 구상을 위하여 아르키메데스 수, 수정 아르키메데스 수, Jet-drop factor 등의 다양한 변인과 도달거리간의 상관관계를 실험을 통하여 규명하고자 하였다. 이때 사용된 아르키메데스 수는 공기가 갖는 부력과 모멘텀의 비율로써 무차원의 형태로 다음과 같이 정의된다 (Abramovich, 1963).

$$Ar = \frac{g \cdot d \cdot (T_i - T_o)}{v_o^2 \cdot T_i} \quad (1)$$

여기서 Ar 은 아르키메데스 수, d 는 유입구의 직경 (m), g 는 중력 가속도 (ms^{-2}), T_i 는 실내 내부 온도 (K), T_o 는 유입되는 외기의 온도 (K), v_o 는 유입구에서의 초기 속도 (ms^{-1})를 의미한다.

사각 형태를 갖는 입기구 구조에서 직경 d 는 수력학적 지름으로 대체가 가능하다.

$$d_{eq} = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_e}{\pi}} \quad (2)$$

$$A_e = Q \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot \Delta p}} \quad (3)$$

여기서 A_e 는 입기구의 유효 면적 (m^2), d_{eq} 는 수력학적 지름 (hydraulic diameter, m), Δp 는 입기구 전후 압력차 (Pa), Q 는 입기구 유량 (m^3s^{-1}), ρ 는 공기 밀도 (kgm^{-3})를 의미한다.

Randall과 Battams (1979)가 제시한 수정 아르키메데스 수는 환기가 이루어지는 대상 공간의 기하학적 형태 및 특성을 반영하기 위하여 수정된 식으로써 식 (4)와 같이 정의된다.

$$Ar_c = \frac{g \cdot (T_s - T_o) \cdot C_d \cdot b \cdot h \cdot (B + H) \cdot BH}{(T_s + T_o) \cdot Q^2} \quad (4)$$

여기서 Ar_c 는 수정 아르키메데스 수, b 는 입기구의 폭 (m), B 는 입기구가 설치된 측벽의 폭 (m), C_d 는 입기구에서의 배출 계수, h 는 입기구 높이 (m), H 는 입기가 설치된 측벽의 높이 (m), T_s 는 바닥 혹은 동물군 열원에서의 온도 (K)를 의미한다.

입기류 도달거리 (Jet-drop distance, D_d)는 입기구로부터 유입된 기류가 동물 군 높이까지 도달 시, 측벽으로부터의 수평거리를 의미한다. 일반적으로 입기류 도달거리가 길수록 시설 내부 상단에 존재하는 상대적으로 높은 열에너지를 보유하고 있는 공기층과 열교환 확률이 증가된다. 따라서 보다 높은 온도의 공기가 동물 군에 제공됨에 따라 열적 균일성 향상 효과 및 호흡기성 질병에 대한 노출을 줄일 수 있다. Fig. 1은 입기류 도달거리 (D_d) 및 입기류 도달높이와 입기구 간의 높이 차 (y_d), 입기구 높이 (y_o)를 도시하고 있다.

Zhang 등 (1996, 1999)은 입기구에서 배출되는 기류의 궤적과 입기류 도달거리간의 관계를 규명하기 위하여 Koestel (1955)과 Abramovich 등 (1963)의 연구결과를 바탕으로 아르키메데스 수, 수력학적 지름, 입기류 도달 거리가 발생하는 수직 높이 및 입기구 간의 높이 차, 입기구의 유입 각도 등 주요 변수로써 제시하였다. 해당 변수로부터 식 (5)와 같은 Jet-drop factor (F_{jd})를 제시하였고 이와 입기류 도달거리간의 상관관계를 토대로 Jet-drop model을 식 (6)과 같이 제시한 바 있다. 그 외에 아르키메데스 수 및 식 (7)과 같은 수정 아르키메데스 수와 입기류 도달거리 간의 상관관계를 분석하였으며 이에 대한 결정 계수 값 및

Fig. 1 The concept of Jet-drop distance in the broiler house

평균평방근 (root-mean-square, RMS) 값을 이용하여 모델 간의 상대 비교를 실시한 바 있다.

$$F_{jd} = \frac{Ar}{y_o \cdot d_{eq}^2} \quad (5)$$

$$Model A: D_d = c_1 + c_2 F_{jd}^{-\frac{1}{3}} \quad (Zhang \text{ et al., } 1996) \quad (6)$$

$$Model B: D_d = c_3 + c_4 Ar_c^{-\frac{1}{3}} \quad (Zhang \text{ et al., } 1999) \quad (7)$$

여기서 c_1 는 모델 A의 매개변수 (m), c_2 는 모델 A의 매개변수, c_3 는 모델 B의 매개변수 (m), c_4 는 모델 B의 매개변수를 의미한다.

2. 시뮬레이션 모델 설계

가. 시뮬레이션 툴

전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD)은 유동 현상을 묘사하는 비선형 편미분 방정식인 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법 (Finite volume method, FVM)과 같은 수치 해석 알고리즘을 사용하여 유체의 거동 문제를 해석하는 학문이다. 본 연구에서는 연구 대상 계사의 구조 설계 및 연산을 위하여 전산유체역학 상용 소프트웨어인 GAMBIT (ver 2.4, Fluent Co. NewHampsher, USA)을 사용하였으며 구성된 격자 계에 대한 비선형 편미분 방정식의 이산화 및 연산을 위하여 FLUENT (ver 6.3, Fluent Co. NewHampsher, USA)를 사용하였다. GAMBIT은 3차원의 기본적인 외형 제작, 정렬 및 비정렬 격자 계의 구성, 경계 조건 정의 등에 사용되는 GUI (Graphical User Interface) 기반의 프로그램이다 (Kwon et al., 2010). FLUENT는 c언어를 기반으로 작성된 상용 프로그램으로 관심 영역에 대하여 작은 스케일의 난류 효과를 시·공간에 대하여 근사화 하는 Reynolds-Averged Navier-Stokes 방정식을 계산한다. 또한 유체 및 에너지의 이동 현상과 관련한 질량, 운동량, 에너지 방정식을 미소 체적에 적용하여 FVM방식에 따라 비선형 연립 편미분 방정식에 대한 해석을 수행한다.

나. 시뮬레이션 모델 설계

연구 대상 계사는 충청북도 음성군에 위치하는 강제 환기식 계사로써 폭 13.5 m, 길이 70 m, 측고 3.5 m, 지붕 최고 높이는 5.5 m이다. 계사 한쪽 측벽에는 폭 600 mm, 높이 600 mm의 정사각형 형태의 크로스 배기팬이 일정한 간격으로 5기가 설치

되어 있으며 슬롯 형태의 입기구가 바닥으로부터 2.6 m 높이에 폭 550 mm, 높이 250 mm 크기로 길이 방향에 대하여 1 m 간격으로 일정하게 배치되어 있다. 환기 시스템의 운영에 따라 각 입기 슬롯을 개방 혹은 폐쇄 하여 사용하고 있다. 입기 슬롯은 입기 각도를 조절할 수 있는 형태로써 계절별 혹은 외기 조건에 따라 입기되는 기류의 초기 유입 각도를 조절하고 있다. 본 연구에서는 동절기 크로스 환기 방식에 따라 길이 방향으로 동일 간격으로 배치되어 있는 배기팬을 중심으로 내부 기류 및 열환경 조성이 반복되어 나타날 것이라는 가정 하에 배기팬 중 1기를 중심으로 전체 길이의 1/5 크기인 14 m를 대상으로 연구 영역으로 설정하였다. 연구 대상 영역의 기본 골격, 팬, 입기 슬롯 등의 환기 구조의 설계 및 수치 계산을 위한 격자 설계는 GAMBIT을 사용하였다. 격자망은 쐐기 (Wedge) 및 육면체 (Hexahedron) 형태로 구성하였으며 설계된 격자망의 크기는 $1.25 \times 10^{-6} \sim 4.04 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 로써 시뮬레이션의 수렴에 지대한 영향을 미치는 입기구 인근에서 보다 조밀한 형태의 비등방 격자망을 구성하였다.

Fig 2 The schematic design of broiler house

Fig. 3 The schematic design of inlet-openings and results of meshing process

격자의 총 개수는 약 160만개로 설계되었다. 입기 슬롯의 경우, 입기되는 기류의 입사각 조절이 용이하도록 설계를 실시하였으며 전체 계산 영역 및 입기 슬롯의 외형, 격자 설계 결과는 각각 Fig 2, 3과 같다.

배기팬이 설치된 측벽의 경우 총 6구의 입기 슬롯을 개방하였으며 반대편 측벽의 경우 총 8구를 개방한 형태의 환기 구조를 가정하였다.

난류 모델은 계산 내부에 형성되는 유동 및 각종 물리량의 해석의 수렴성에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 본 연구에서는 Lee 등 (2007)에 의하여 수행된 육계사를 대상으로 한 풍동 (Wind tunnel) 실험, PIV (Particle image velocimeter) 시험 결과 및 CFD 시뮬레이션 결과의 비교 분석 결과 가장 높은 모의 정확도를 보인다고 판단된 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. RNG $k-\epsilon$ 난류 모델은 통계 처리를 통하여 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도된 모델로써, 기존의 Standard $k-\epsilon$ 난류 모델과 유사하나 k , ϵ 값의 보정을 통하여 거칠고 빠른 유동 및 와류 유동 해석에 있어서 더 높은 정확도를 나타내는 것으로 알려져 있다 (Kwon et al., 2010). 본 난류 모델에 대한 난류 동적에너지 k 및 ϵ 에 대한 소산율 ϵ 의 방정식은 각각 식 (8), (9)와 같다 (Fluent manual, 2011).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \quad (8)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_k u_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i}) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) \quad (9)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_\epsilon u_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}) + G_\epsilon \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_{3\epsilon} G_b) - G_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R\epsilon + S_\epsilon$$

여기서 $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ 는 상수, k 는 난류 동적 에너지, G_k 는 평균 속도 구배에 의한 난류 동적 에너지의 생성, G_b 는 부력에 의한 난류 동적 에너지의 생성, $R\epsilon$ 은 RNG $k-\epsilon$ 방정식으로부터 얻은 결과 값, S_k 와 S_ϵ 는 소스항, Y_M 은 전체 확산 과정에서 압축성 난류의 팽창 정도, α_k , α_ϵ 는 각각 k 와 ϵ 의 inverse effective Prandtl 수, ϵ 는 k 에 대한 소산율을 의미한다.

다. 실험 방법

다양한 환경 조건에 따른 입기류 도달거리 산정을 위하여 입기류의 유입 각도를 결정하는 슬롯의 설치 각도 (15, 30, 45, 60, 75, 90°), 3가지 외기 조건 (-15, 0, 15 °C) 및 6가지 환기량

Table 1 Input data of CFD simulation model used for this study

Contents		Values
Temperature	Outdoor air temp.	-15, 0, 15 °C
	Wall temp.	Depending on outdoor temp.
	Floor temp.	25 °C
	Indoor air temp.	25 °C
Density	Air (-15 °C)	1.367 kgm ⁻³
	Air (0 °C)	1.293 kgm ⁻³
	Air (15 °C)	1.225 kgm ⁻³
Specific heat of air (15 °C)		1006.43 Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Thermal conductivity of air (15 °C)		0.0242 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Installed angle of slot-type openings		15, 30, 45, 60, 75, 90°
Designed ventilation rates (air exchange rate)		0.05, 0.075, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30 AER (min ⁻¹)
Turbulence model		RNG $k-\epsilon$ model

Table 2 Designed air-exchange-rate (AER) and velocity magnitude value at exhaust fan

AER	Flow rate (m ³ min ⁻¹)	Fan velocity-magnitude (ms ⁻¹)
0.050	42.53	1.97
0.075	63.79	2.95
0.100	85.05	3.94
0.150	127.58	5.91
0.200	170.10	7.88
0.300	255.15	11.81

(0.05, 0.075, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30 AER: Air exchange rate, 회/min)을 변수로 설정하여 총 108가지의 실험 조건을 구성하였다 (Table 1). 비정상상태에 대하여 해석을 수행하였으며 초기 유동이 존재하지 않는 상태에서 수 초 동안 환기 팬을 작동하여 내부 기류 패턴이 형성되었을 때 계군 평균 높이 즉, 바닥으로부터 40 cm 떨어진 높이에서의 온도 변화를 모니터링 하였다. 계군 바닥의 온도는 일반적인 육계의 2~3주령 시 평균 사육 권장 온도를 기준으로 25 °C 를 가정하였다. 입기류 도달거리의 산정은 먼저 정성적인 유동 및 온도장 분석을 통하여 Free-jet 조건에 부합되는 경우를 추출하고 계군 높이에서의 온도 값을 토대로 정성적인 결과와 함께 각 환경 조건에 따른 입기류 도달거리 값을 제시하고자 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 환경 조건별 입기류 정성 분석

설계 조건 별 총 108가지 구조에 대하여 각각의 입기류 도달

Fig. 4 Results of velocity field and air temperature distribution

Fig. 5 Results of air temperature distribution from slot-type inlet (R3) according to the performance time of ventilation

거리 산정에 앞서, 음압식 환기 시스템이 작동되는 시간에 따라 형성되는 유동장 및 온도장 분포를 토대로 해석 대상이 되는 적정 시간에 대한 선정 작업을 실시하였다. 먼저 본 연구에서는 다음 Fig. 4와 같이, 계사 영역 내부에 형성되는 온도장이 유동장의 형태에 지배됨을 확인하였고 이에 각 구조별 온도장을 토대로 정성적인 분석을 실시하고자 하였다.

Fig. 5는 환기시스템이 작동된 후, 각각 10초, 20초, 60초 및 120초 후의 계사 내부에 형성되는 온도장 분포로써, 환기가 진행됨에 따라 입기류의 형태가 변화되는 현상을 확인할 수 있었다. 10초의 경우 입기 슬롯으로부터 유입되는 기류가 아직 계군 영역에 도달하지 않아 입기류 도달거리의 정량적인 파악이 어렵다고 판단되었으며 60초의 경우 이미 유입된 외기가 계군에 도달한 후, 바닥면에서 확산되어 낮은 온도 분포를 갖는 영역이 넓

게 나타나, 입기류가 도달한다고 판단되는 임의의 지점을 선택하는데 문제가 있을 것이라 사료되었다. 120초의 경우 과다 환기로 인하여 계사 내부의 온도가 사육 권장 온도보다 극심하게 낮아지는 것을 확인하였으며 이로 인한 부력 변화로 인하여 입기 슬롯으로부터 유입되는 기류가 천정을 향하여 뿔어나가는 현상을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 입기류 도달거리 선정을 위한 적정 시간으로써 환기가 진행된 후 20초 당시를 선정하였으며 이는 실제 동절기 계사 환기 운영 조건 즉, 일반적으로 호흡기성 질병 방지 등을 이유로 30초 미만이 추천되는 현실을 고려하였을 때 적절하다고 판단되었다.

Fig. 6은 입기류가 유입되는 입기 슬롯의 각도가 45°, 설계 환기량이 0.15AER일 때 외기 온도에 따른 정성적인 온도 분포이다. 일반적으로 대부분의 구조에서 외기 온도가 높아질수록 입기

Fig. 6 Results of air temperature distribution from slot-type inlet (R3) according to the outdoor temperature at 20sec. after ventilation was started

Fig. 7 Results of air temperature distribution from slot-type inlet (L4) according to the installed angle of guiding plate of slot openings at 20sec. after ventilation was started

Fig. 8 Results of air temperature distribution from slot-type inlet (R3) according to the designed ventilation rate (AER) at 20sec. after ventilation was started

구에서 사출되는 기류가 상대적으로 상부 측을 향하여 뻗어나가는 경향을 확인할 수 있었으며 이는 외기가 환기가 이루어지는 대상 공간으로 유입될 때 갖는 부력 및 모멘텀의 차이에 기인한

결과로 사료된다.

Fig. 7은 설계 환기량 0.200AER, 외기 온도가 -15°C 일 때, 슬롯의 설치 각도에 따른 온도장 분포이다. 해당 설계 조건의 경

우 슬롯 각도가 15, 30°일 때, 입기류로부터 사출된 기류가 지붕 천정을 타고 뿔어나감으로써 Free-jet 조건에 위배되는 형태로 존재하였다. 해당 조건에서 입기 각도가 45°일 때 다른 입기 각도 조건과 비교하여 입기류 도달거리 가장 길게 나타났으며, 입기 각도가 증가할수록 도달거리는 점차 감소하고 동물 군에 도달하는 입기류의 온도 또한 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 설치 각도가 입기류 도달거리 및 동물 군에 접촉하는 온도 분포를 결정하는 요소임을 상기시키는 결과라고 볼 수 있다.

Fig. 8은 60°의 입기 슬롯에 대하여 -15℃의 외기 조건일 때, 설계 환기량에 따른 내부 온도장 분포이다. 0.05, 0.075AER 일 경우 입기류가 대부분 뿔어나가지 못하고 벽면을 타고 흘러내리는 형태를 보였다. 국내 동절기 설계 환기량으로 추천되는 0.05 ~ 0.10AER을 환기 조건으로 설정할 경우 저온의 외기가 지붕 상단 측에 존재하는 고온의 공기와 열교환을 하지 못하고 벽체 인근의 동물 군에 직접적으로 도달하는 것이 확인되었다. 따라서 이 영역에 위치하는 동물 군의 열적 스트레스 증가 및 호흡기성 질병의 발병 가능성이 존재한다고 유추할 수 있다. 이는 실제 동절기 계사 운영 시 주로 보고되는 측벽 인근에서의 높은 폐사율, 계군의 응집 및 특정 영역의 회피 현상 등을 뒷받침하는 결과라고 판단할 수 있다. 이후 환기량이 증가할수록 입기류 도달거리가 점차 증가하였으며, 시간당 공기 교환량이 증가함에 따라 계사 내부의 평균 온도 또한 점차 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

2. 입기류 도달 거리의 산정

환경 조건 별 입기류 도달거리의 산정을 위하여 시뮬레이션 연산이 수행되는 동안 계군 높이 즉, 바닥으로부터 40 cm 높이에서 계사 폭 방향에 따른 온도 분포 데이터를 실시간으로 모니터링하였다. 폭 방향 온도 데이터, 정성적인 온도장을 바탕으로, 구조 별 R3, R7, L4, L6 입기 슬롯에서의 입기류 도달거리를 산정하고자 하였으며 그 대표적인 결과는 Fig. 9, 10, 11과 같다. 슬롯의 각도가 45°, 0.15AER의 환기량 그리고 외기 조건이 -15℃ 일 때 R7 입기 슬롯에서 형성되는 온도장 분포 및 계군 높이에서의 온도 데이터는 Fig. 9와 같다. 해당 조건의 경우, 정성적 및 정량적 결과로부터 3.91 m의 입기류 도달거리를 용이하게 산출할 수 있었다. Fig. 10의 경우, 정성적 결과를 통하여 입기구로부터 사출되는 기류가 측벽 면을 타고 흘러내리는 형태로 존재하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 앞선 Fig. 9와 비교하여 상대적으로 낮은 설계 환기량, 즉 공기 교환량 및 입기 슬롯의 각도 조절에 따른 입기 단면적의 증가 등을 그 원인으로 지적할 수 있다. 그러나 Fig. 11의 경우 온도 분포 모니터링을 통한 정량적 데이터만을 토대로 판단할 경우 외기가 도달했을 것

으로 판단되는 지점을 선정할 수 있으나 실제 유동장 형태와 함께 비교 분석 시, 판단의 오류를 범할 수 있는 가능성을 내포하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Zhang 등 (1996, 1999)도 그들의 연구를 통하여 열전대 등을 이용한 대상 공간에서의 열환경 모니터링만으로는 정확한 입기류 도달거리를 선정하는데 한계가

Fig. 9 Determination of Jet-drop distance when the experimental condition is; inlet-angle 45°, 0.150AER, -15 °C and R3

Fig. 10 Determination of Jet-drop distance when the experimental condition is; inlet-angle 60°, 0.050AER, -15 °C and R7

Fig. 11 Determination of Jet-drop distance when the experimental condition is; inlet-angle 30°, 0.200AER, -15 °C and L4

있음을 지적한 바 있으며 이로 인하여 연기 발생기 등을 이용하여 정성적인 형태의 기류를 관측하고자 시도한 바 있다. 따라서 Fig. 11 등의 사례를 통하여 CFD를 이용한 입기류 도달거리 산정 연구의 당위성을 제시할 수 있다고 판단할 수 있다.

3. 입기류 도달거리 및 설계변수 간의 선형회귀 분석

환경 조건으로 설정한 108가지의 구조 중 대표적인 거리 별 4개의 입기 슬롯을 대상으로 총 432개의 도달거리 데이터를 추출하였다. 이를 토대로 정성적 결과에 기반하여, 지붕 측 단면 등 구조적 영향으로 인한 Free-jet 조건에 위배되는 결과를 제외한 후, 폭 방향 별 온도 모니터링 결과를 토대로 입기류 도달거리를 산정하였다. 각 환경 조건 별로 유입구의 특성을 반영한 Jet-drop factor 및 전체 형상에 대한 물리적인 정보를 포함하는 수정 아르키메데스 수 등을 산출하였으며 이를 이용하여 Zhang 등 (1999)이 제시한 회귀 모델 A 및 모델 B에 적용해 본 결과는 다음과 같다.

$$\text{Model A: } D_d = -1.3243 + 3.6570 F_{jd}^{-\frac{1}{3}} \quad (10)$$

먼저, Jet-drop factor를 이용한 회귀 모델 A는 다음 식 (10)과 같이 표현된다. 단순회귀분석법을 통하여 회귀 계수 즉 C_1 및 C_2 값은 각각 -1.3243, 3.6570으로 나타났으며 이때 표본 자

Table 3 Results of regression analysis of model A

Regression Model A	C_1	C_2	R^2	MSE	
Total	-1.324	3.657	0.744	0.409	$P < 0.005$
Slot-location	R3	-1.113	3.595	0.781	$P < 0.005$
	L4	-1.668	4.225	0.776	$P < 0.005$
	L6	-1.765	4.114	0.763	$P < 0.005$
	R7	-2.369	5.109	0.852	$P < 0.005$

Fig. 12 Regression analysis of model A: $R^2 = 0.7444$

료를 통하여 산출한 결정계수 (coefficient of determination, r^2)는 0.7444 수준으로 나타나 해당 모델을 통하여 약 74 %가 회귀 방정식에 의하여 설명되고 있다고 판단할 수 있다 ($P < 0.005$). 이때 자료의 확산 정도를 평가하기 위하여 오차자승합 (Error sum of squares, SSE)을 자유도 (Degree of freedom)로 나누어준 MSE 값은 0.4094로 계산되었다. 슬롯 위치에 따른 각각의 회귀 방정식을 구성하는 회귀계수, 결정계수, MSE 값은 Table 3과 같다.

$$\text{Model B: } D_d = -1.2922 + 53.23 A_{rc}^{-\frac{1}{3}} \quad (11)$$

수정 아르키메데스 수를 이용한 회귀 모델 B는 다음 식 (11)과 같이 표현된다. 모델 B의 회귀 방정식의 계수 즉 C_3 및 C_4 값은 각각 -1.2922, 53.230으로 나타났으며 이때 표본 자료를 통하여 산출한 결정계수는 0.737 수준으로 나타나 해당 모델을 통하여 약 74 %가 회귀 방정식에 의하여 설명된다 ($P < 0.005$). 이는 Jet-drop factor를 이용한 모델 A와 비교하였을 때 약간의 결정계수 값의 하락을 보이는 것으로 나타났다. 이는 Zhang 등 (1999)의 연구 결과와 마찬가지로, 두 모델은 서로 매우 근소한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 회귀 방정식의 확산 정도를 평가하기 위한 MSE 값은 0.4220 정도로 계산되었다. 입기 슬롯 위치에 따른 모델 B의 각각의 회귀계수, 결정계수 및 MSE 값은

Fig. 13 Regression analysis of model A: according to the inlet-opening

Table 4 Results of regression analysis of model B

Regression Model B		C_3	C_4	R^2	MSE	
Total		-1.292	53.230	0.737	0.422	$P < 0.005$
Slot-location	R3	-1.082	52.354	0.774	0.325	$P < 0.005$
	L4	-1.625	61.366	0.765	0.368	$P < 0.005$
	L6	-1.739	60.010	0.754	0.465	$P < 0.005$
	R7	-2.337	75.773	0.842	0.458	$P < 0.005$

Table 4와 같다.

CFD 시뮬레이션을 이용하여 각 환경 조건 별로 산출한 입기류 도달거리를 토대로 Zhang 등 (1996, 1999)이 제시한 선형 회귀 모델 A, B를 각각 적용해본 결과 두 모델 모두, 선행 연구에서 제시하였던 결정계수 치에 비하여 다소 하락한 수치를 보이는 것으로 나타났다. 이는, 입기 슬롯을 1개, 3개로 실시하였던 선행연구와는 달리 총 14개의 입기 슬롯이 교차로 마주보고 있는 실제 육계사 형태의 환기 구조를 회귀 모델에 적용시킨 것에 따른 자료의 오차 및 변동으로 판단된다.

Fig. 14 Regression analysis of model B: $R^2=0.7368$

IV. 결 론

동절기의 육계사 환기 시스템 운영 시, 동물군의 적정 환경 조성을 위하여 입기 슬롯으로부터 유입되는 기류의 궤적 조절은

Fig. 15 Regression analysis of model B: according to the inlet-opening

매우 중요하다. Zhang 등 (1996, 1999)은 입기류의 특성, 환기가 이루어지는 대상 공간의 형상 등을 고려한 Jet-drop factor, 수정 아르키메데스 수 등을 이용하여 입기류 도달거리간의 선형 회귀 모델을 제시한 바 있다. 그러나 현장 실험 시, 입기류 도달거리를 측정에 있어서, 눈에 보이지 않는 기류의 정성적인 파악의 어려움, 데이터 획득의 불확실성, 많은 시간과 노동의 소요 등이 지적된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 농업 시설의 환기 연구에 활발히 활용되고 있는 CFD 시뮬레이션 기법을 이용하여 입기류 도달거리의 정성적, 정량적 측정을 통하여 선행 연구에서 지적되었던 한계점을 극복하고자 하였다. 앞선 연구들이, 입기 슬롯이 1개 및 3개 존재하는 실내 실험에 국한된데 비하여 본 연구에서는 실제 육계사 구조를 대상으로 총 14개의 입기 슬롯이 교차로 마주보고 있는 구조에 대하여 연구를 수행하였다. 그 결과 Zhang 등이 제시한 선형 회귀 모델 중, Jet-drop factor를 이용한 모델 A의 경우 0.744의 결정계수를, 수정 아르키메데스 수를 이용한 모델 B의 경우 0.737의 결정계수를 갖는

것으로 나타나 두 모델이 각각 대략 74 % 정도로 주어진 변수에 대하여 입기류 도달 거리를 예측할 수 있는 것으로 판단되었다. 선행연구에서 제시되었던 결정계수치에 비하여 다소 감소하는 경향이 나타났으나 이는 양쪽 측벽에서 다수의 교차로 개방된 입기 슬롯으로 인한 복잡한 내부 공기 유동에 따른 오차 및 변동에 의한 결과라고 사료된다.

본 연구를 통하여 Jet-drop distance 이론과 CFD 시뮬레이션의 접목에 대한 활용 가능성을 검토를 하였으며, 향후 현장 검증 실험 등을 통하여 시뮬레이션 모델의 정확도를 향상시킬 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 기존에 제시되었던 변수 외에 모델 정확도를 향상시킬 수 있는 새로운 변수의 도출 및 예측 모델 등의 후속 연구가 필요하다. 다양한 환기 작동 시간에 따른 각각의 입기류 도달거리 산출을 위한 선형 모델 제시 및 데이터베이스 구축을 통하여 실제 육계사 운영 시, 각 환경 인자의 실시간 모니터링에 따른 동절기 환기 시스템의 탄력적인 운영 및 안정적인 열환경 조성에 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

REFERENCES

1. Abramovich, G. N., 1963. *The Theory of Turbulent Jets*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
2. Berchmans, D., J. M. Randall, D. Van Thielen, and V. Goedseels, 1993. Validity of the Archimedes number in ventilating commercial livestock buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 56(3): 239-251.
3. Fluent. 2011. *The manual of computational fluid dynamics (CFD)*, Version 6.3. Lebanon, N.H.: Fluent, Inc.
4. 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. H. 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. (in Korean)
5. Koestel, A. 1955. Paths of horizontally projected heated and chilled air jets. *Transactions of the ASHAE*. 61: 213-232.
6. Kwon, K. S., I. B. Lee, H. S. Hwang, J. P. Bitog, S. W. Hong, I. H. Seo, J. S. Choi, S. H. Song, and O. K. Moon, 2010. Analysis on the optimum location of an wet air cleaner in a livestock house using CFD technology. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 52(3): 19-29. (in Korean)
7. Lee, I. B., S. Sase, S. H. Sung, 2007, Evaluation of CFD accuracy for the ventilation study of a naturally ventilated broiler house. *Japan Agricultural Research Quarterly*. 41(1): 53-64.
8. Leonard, J. J., and J. B. McQuitty 1986. Archimedes number criteria for the control of cold ventilation air jets. *Canadian Agricultural Engineering*. 28(2): 117-123.
9. Park, Y. W., H. Hong, and I. B. Lee, 2004. Analysis of heating energy in a naturally ventilated broiler house. *The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*. 2004: 58. (in Korean)
10. Randall, J. M., and V. A. Battams, 1979. Stability criteria for airflow patterns in livestock buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 24(4): 361-374.
11. Statistics Korea, 2011, <http://www.kosta.go.kr> Accessed 20 Oct. 2011.
12. Zhang, G., S. Morsing, and J. S. Strøm, 1996. Modeling jet drop distances for control of a nonisothermal flap-adjusted ventilation jet. *American Society of Agricultural Engineers*. 39(4): 1421-1431.
13. Zhang, G., and J. S. Strøm, 1999. Jet drop models for control of non-isothermal free jets in a side-wall multi-inlet ventilation system. *American Society of Agricultural Engineers*. 32(4): 1121-1126.