



전산유체역학을 이용한 표준 오리사 설계안에 대한 환기효율성 분석

Analysis on Ventilation Efficiency of Standard Duck House using Computational Fluid Dynamics

여육현* · 조예슬* · 권경석* · 하태환* · 박세준* · 김락우* · 이상연* · 이승노* · 이인복* · 서일환**,†

Yeo, Uk-Hyeon · Jo, Ye-Seul · Kwon, Kyeong-Seok · Ha, Tae-Hwan · Park, Se-Jun · Kim, Rack-Woo · Lee, Sang-Yeon · Lee, Seung-No · Lee, In-Bok · Seo, Il-Hwan

Abstract

In Korea, 69.4 % of duck farms had utilized conventional plastic greenhouses. In this facilities, there are difficulties in controlling indoor environments for raising duck. High rearing density in duct farms also made the environmental control difficult resulting in getting more stressed making their immune system weaker. Therefore, a facility is needed to having structurally enough solidity and high efficiency on the environmental control. So, new design plans of duck house have recently been conducted by National Institute of Animal Science in Korea. As a study in advance to establish standard, computational fluid dynamics (CFD) was used to estimate the aerodynamic problems according to the designs by means of overall and regional ventilation efficiencies quantitatively and qualitatively. Tracer gas decay (TGD) method was used to calculate ventilation rate according to the structural characteristics of duck houses including installation of indoor circulation fan. The results showed that natural ventilation rate was averagely 164 % higher than typically designed ventilation rate, 1 AER (min^{-1}). Meanwhile, mechanically ventilated duck houses made 81.2 % of summer ventilation rate requirement. Therefore, it is urgent to develop a new duck house considering more structural safety as well as higher efficiency of environmental control.

Keywords: Air exchange rate; CFD; duck house; tracer gas decay; ventilation rate

1. 서론

국내 축산업 총 생산액은 2013년 기준 16조 2천억원에 육박하고 있으며, 농·축산업 총 생산액의 34.8%로 높은 비중을 차지하고 있다(MAFRA, 2014). 그 중 국내 오리 산업 규모는 돼지, 한우, 우유, 닭, 계란에 이어 6위인 1조 450억원에 달한다(MIFAFF, 2012). 국내 오리 산업규모는 축산업의 전문화, 대형화에 따라 성장하고 있는 반면 사육시설은 매우 열악하여, 오리 사육농가의 69.4%는 플라스틱 온실 등을 개량한 간이오리사 형태의 사육 시설을 이용하고 있다(RDA, 2011). 개량 간이 오리사의 경우, 초기 설치비용이 적은 이점이 있으나 태풍 또는 폭설 등의 기상재해에 구조적인 취약점을 가지고 있다. 또한 하절기 폭염과 집중호우 시 시설 내부에 적절한 온도 및 습도를 유지시키기 위한 냉방 및 제습이 요구되며, 동

절기에는 침기와 피복재의 단열성 문제로 추가적인 난방 에너지 투입이 필요하다.

오리 사육에 있어 사육 시설 내부의 환기량, 온도, 공기 유동 등의 적정 생육 환경은 안정적인 생산성 확보에 매우 중요하다(Hwangbo et al., 2006). 내부의 적정 환경 조절을 위한 주요 메카니즘은 환기이다. 환기를 통하여 시설 내부의 유해 가스 제거 및 온도와 습도를 적정하게 조절할 수 있으며, 적절한 환기량을 충족시키지 못하면 시설 내에 먼지와 유해가스 등의 오염물질의 농도가 높아지며, 이는 곧 가축의 면역력 저하 및 질병발생을 야기할 수 있다(Song et al., 2012). 따라서 환기를 고려하여 시설 내부 환경을 조절함으로써, 농가의 생산성 증대 및 질병의 피해를 최소화하기 위한 적정 설계기준 마련이 필요하다.

설계기준에 따른 표준 오리사의 사육환경은 현장실험과 수치해석을 통하여 분석할 수 있다. 현장실험은 실제 현장조건을 고려한 현실적인 값을 제시할 수 있는 장점이 있으나 측정을 위해 많은 비용과 시간이 요구되며, 시시각각 변화하는 온도, 습도 등 내부의 환경변이에 대한 제어의 어려움이 있다. 더욱이 측정방법의 한계로 점 측정에 의존해야 하므로, 공기 유동을 정성적·정량적으로 이해하고 분석하는데 어려움이 있다. 수치해석을 통하여 분석하는 경우, 환경의 변수 및 경계 조건 등에 대한 가정이 필요하지만, 현장실험의 한계점을 보완할 수 있으며 막대한 데이터를 확보할 수 있어 관심영역에

* Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

** Center for Green Eco Engineering, Institute of green Bio Science & Technology, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-33-339-5813 Fax: +82-33-339-5830

E-mail: siwbest0@snu.ac.kr

Received: July 3, 2015

Revised: August 25, 2015

Accepted: August 26, 2015

대한 탄력적인 분석이 가능하다. 이에 최근 농업 분야에서 전산유체역학(CFD, Computational fluid dynamics)을 이용한 환기 해석, 생육 환경 평가 등과 관련한 연구가 증가하고 있는 추세이다. Lee et al. (2007), Seo et al. (2008) 등은 축산 시설 내에서의 공기유동과 열환경 그리고 환기효율성을 정량적·정성적으로 분석한 바 있으며 Norton et al. (2010)은 CFD를 이용하여 자연 환기식 축산시설을 대상으로 환기 배열에 따른 내부 환경의 균일성을 평가하여 최적 환기 운영 방식을 도출하고자 하였다. 또한 Sapounas et al. (2012)는 우사의 지붕 형태에 따른 자연환기 효과 분석을 실시한 바 있으며 Wu et al. (2012)은 돈사 내 피트 아랫부분에서 발생하는 가스양을 저감하기 위한 피트 환기시스템의 성능 평가를 실시한 바 있다. 이처럼 축산시설의 내부 환기 해석, 열 환경 예측 등의 중요성이 부각됨에 따라 CFD기법을 이용한 시뮬레이션 연구가 활발히 이루어지고 있는 추세이다 (Norton et al., 2010; Bjerg et al., 2013b).

본 연구에서는 표준 오리사 설계도 작성을 위한 기초 연구로써, 전산유체역학을 이용하여 표준 오리사 설계 시 발생 가능한 공기유동학적 문제점을 미리 예측하고 축산과학원에서 제시한 표준 오리사 환기구조의 적합성 여부를 분석하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상지역 및 기상조건

본 연구의 대상지역은 약 100만 마리의 오리 사육규모를 가지고 있는 음성군으로 한우·젓소·돼지·사슴·오리·닭 등의 다양한 축종이 사육되고 있다(MAFRA, 2014). 외부 기상환경(풍속, 온도 등)은 가축 사육환경에 영향을 미치는 주요 요소이다. 특히, 혹서기의 고온다습한 기상조건은 가축의 열적 스트레스를 유발하여 폐사량 증가와 품질 저하 및 개체수에 큰 영향을 미친다. 따라서 하절기를 대상으로 분석하기 위하여 충청북도 음성군 지역의 2000년부터 2009년의 하절기(7~8월) AWS(Automatic weather station) 기상자료로부터 시뮬레이션 경계조건을 부여하였으며, 이 기간 동안 평균온도는 26.3 °C, 평균풍속은 1.3 m·s⁻¹이었다.

2. 대상시설

축산과학원에서 제시한 오리사 모델은 크게 자연환기식과 강제환기식 구조로 구분된다. 오리사의 규격은 Fig. 1, 2와 같이 규격에 따라 총 4가지의 모델이며 시설 내부 공간의 경우 전실과 오리 사육 공간으로 구분된다. 전실은 시설내부 자동

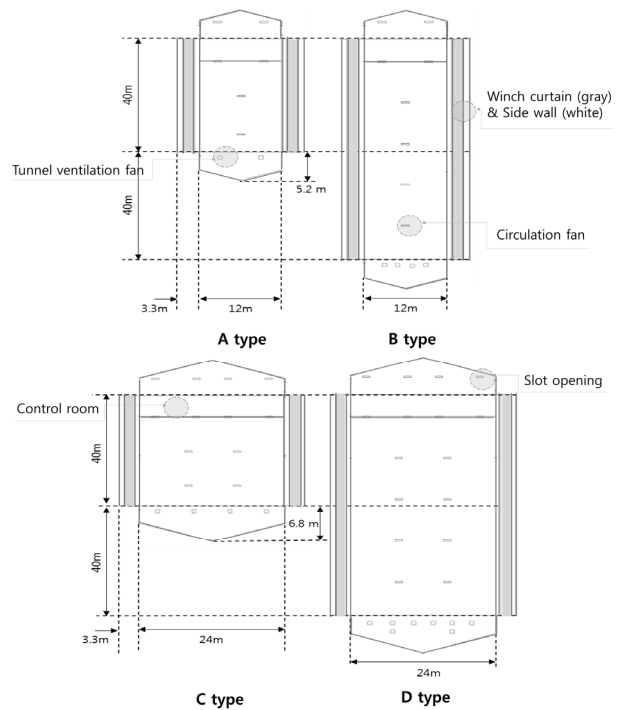


Fig. 1 A structural drawing of naturally ventilated duck house suggested by National Institute of Animal Science (NIAS, 2014)

화 시스템의 제어 등을 목적으로 입구로부터 길이 방향으로 4.0 m가 할당 되었으며, 그 외 영역은 사육 공간으로 할당되었다. 폭이 12 m인 모델(A, B 형)은 축고 3.3 m, 동고 5.2 m이며, 폭이 24 m인 모델(C, D 형)의 축고는 A, B형 모델과 동일하고 동고는 6.8 m로 설계되었다. 각 모델의 전면부 상단에는 폭 1.2 m, 높이 0.3 m 크기의 입기 슬롯이 지면에서 3.0 m 높이에 설치되어 있으며, 오리사규격에 따라 2구 또는 4구가 설치되었다. 자연환기식 오리사의 경우, 측벽에 지면으로부터 0.7 m 높이에 높이 1.8 m × 길이 40 m, 높이 1.8 m × 길이 80 m의 윈치커튼이 오리사 규격에 따라 설치되어 있다. 또한 추가 환기량 확보를 목적으로 후면부에 4,061 CMH (Cubic Meter per Hour)의 배기팬이 규격에 따라 2, 4, 8대가 설치되어 있다. 시설 내부에는 내부 생육환경의 균일성 향상을 목적으로 4,061 CMH의 순환팬(폭 0.63 m × 높이 0.63 m × 깊이 0.1 m)이 상향으로 10° 가량 기울어진 상태로 10 또는 15 m 간격으로 설치되어 있다.

강제환기식 오리사의 각 모델 양쪽 측벽에는 폭 1.2 m × 높이 0.3 m 크기의 입기 슬롯이 바닥면을 기준으로 2.7 m 높이에 설치되어 있다. 전면부에는 자연환기식 오리사와 동일하게 출입문 높이를 고려하여 바닥으로부터 3.0 m 높이에 입기 슬롯이 설치되었다. 또한 4,061 CMH (0.63 m × 0.63 m)와

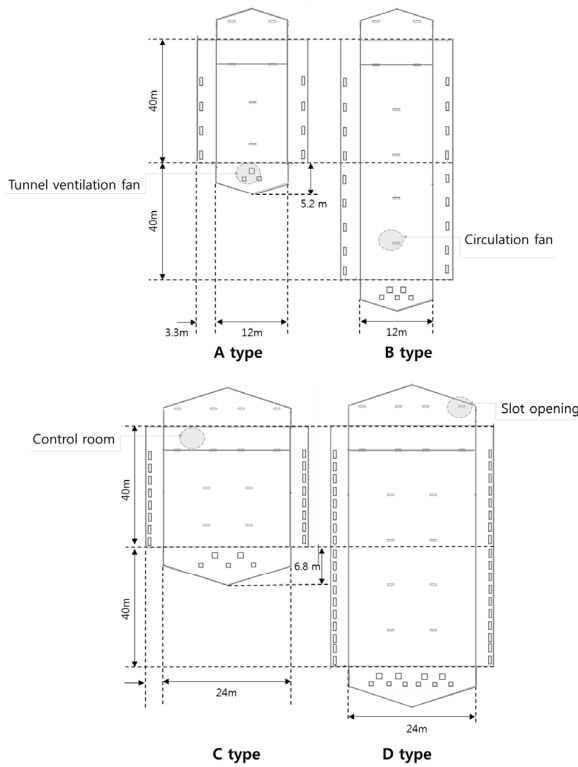


Fig. 2 A structural drawing of mechanically ventilated duck house suggested by NIAS (NIAS, 2014)

7,063 CMH (0.92 m × 0.92 m)의 환기팬이 입구의 반대 면에 오리사 규격에 따라 Fig. 2와 같이 설치되었다. 음압식으로 운영되는 시설 내부 입구배면에 설치된 터널환기팬을 이용하여 양쪽 측면과 전면부에 설치된 입기 슬롯을 통하여 외부로부터 공기가 유입된다. 오리사의 입기 슬롯 개수는 각 시설물 (A, B, C, D 형) 규격들에 따라 각각 10, 20, 20 그리고 40구가 일정 간격으로 설치되었다. 시설 내부에는 내부 생육 환경의 균일성 향상을 목적으로 4,061 CMH의 성능을 갖는 가로 0.63 m × 세로 0.63 m × 깊이 0.1 m의 순환팬이 상향으로 10° 기울어져 10 m 간격으로 설치되었다.

3. 전산유체역학 (CFD: Computational Fluid Dynamics)

CFD는 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 각 격자에 대한 질량, 운동, 에너지 방정식 등을 풀이하고 해석하는 기술이다. 전처리 단계에서 기본적인 외형과 유한개의 격자망을 형성하고 경계 조건 지정을 통하여 모델을 설계한다. 주 연산 단계에서는 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 유체 및 에너지의 이동과 관련된 질량, 에너지, 운동량 보존법칙을 각각의 격자에 적용하여 이산화 과정을 거친 후 연산한다.

4. 환기량 산정 방법

가. 질량교체환기량 (MFR: Mass Flow Rate)

질량교체환기량은 환기에 대한 효과를 정량화하기 위한 일반적인 방법으로 공기의 유·출입구 면적과 유속을 통하여 쉽게 환기율을 산정할 수 있는 장점이 있다. 질량 보존 법칙에 따라 유입된 공기와 유출된 공기의 양은 동일하며 이를 통해 시설 내부의 공기가 교체된다는 가정을 전제로 환기구에 형성된 격자에 대한 풍속 값, 공기 밀도 값, 유입구 면적, 배출구 면적, 시설체적 등을 바탕으로 환기율을 산정한다. 유입구, 유출구에서 작용하는 풍향에 따라 시설 내부로 유입되는 공기량이 결정되며 보다 정확한 질량 유량산정을 위하여 입기구와 직교하는 축 방향 속도를 기준으로 계산한다. 뿐만 아니라 밀도 또는 압력 차로 발생하는 후류 등과 같은 기류의 영향으로 인해 유·출입면에서 질량유량의 유입과 유출이 동시에 발생하는 현상 또한 고려할 수 있다.

$$G = v_x \times \rho_{air} \times A \quad (1)$$

G : Mass flow rate ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)

v_x : Velocity about x component ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

ρ_{air} : Air density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

A : Area of each cell of inlet and outlet (m^2)

나. 추적가스 감쇠법 (TGD: Tracer Gas Decay method)

추적가스 감쇠법은 추적가스 확산에 의한 농도 변화를 통하여 환기량을 산정하는 방법으로 단순한 질량교체환기율과 비교하여 높은 정확도를 나타내는 것으로 알려져 있다 (Hong et al., 2008). 현장실험을 통하여 추적가스 감쇠법을 적용하는 경우 초기에 균일한 가스 농도 및 온·습도를 유지하는 것이 어려우며, 다점에 대한 측정방법의 한계로 오차가 크게 발생할 가능성이 높다. 반면 전산유체역학을 적용할 경우 해석영역 내의 환경 조건을 일정하게 유지시킬 수 있으며, 식 (2)를 사용하여, 대상 시설 전체에 대한 추적가스의 희석 추이를 통하여, 시설 전체의 환기량 뿐만 아니라 지역적 환기량을 정량적으로 산출할 수 있다는 장점이 있다 (Ha, 2015).

$$AER_{TGD} = \frac{\ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right)}{(t-t_0) \times 60} \quad (2)$$

AER_{TGD} : Ventilation rate resulted from tracer gas decay approach ($\text{AER}\cdot\text{min}^{-1}$)

C_t : Mass fraction of tracer gas at the specific time (dimensionless)

C_0 : Mass fraction of initial tracer gas (dimensionless)

t : Specific time (sec)

t_0 : Initial time (sec)

5. 시뮬레이션 방법

가. CFD 모델 설계

자연환기식 오리사는 Fig. 1과 같이 A, B, C, D형으로 구분되며, 각 규격별로 Table 1과 같이 4개의 환기방식을 적용하였다. 각 환기방식은 1) 윈치커튼만으로 환기되는 기본구조, 2) 윈치커튼과 배기팬 조합의 환기구조, 3) Type 2에서 10 m 간격으로 순환팬이 설치된 환기구조, 4) Type 2에서 15 m 간격으로 순환팬이 설치된 환기구조이다. 강제환기식 오리사는 Fig. 2와 같이 A, B, C, D형으로 구분되며, 각 규격별로 1) 순환팬 없이 터널배기만으로 환기하는 기본구조와 2) 순환팬이 10 m 간격으로 설치된 환기구조를 고려하였다.

연산 시간과 설계의 편의성을 위하여 유동에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서 시설 내부의 급이기, 급수기 등은 단순화하여 모델을 설계하였다. 또한 공기는 비압축성 이상기체로 가정하였고 오리사 내부에는 공기와 추적가스 이외의 가스는 존재하지 않으며 가스나 입자들 간의 물리·화학적 반응에 의한 응집체 형성은 존재하지 않는다고 가정하였다. 난류 모델의 경우, 축산 시설을 대상으로 풍동 및 PIV 실험을 바탕으로 예측 신뢰도가 가장 높다고 제시한 바 있는 RNG k-ε 난류 모델을 사용하였다 (Lee et al., 2007). RNG k-ε 난류 모델은 Standard k-ε 난류 모델에서 추가적으로 변형속도에 대한 항을 고려함으로써 복잡한 전단흐름과 큰 변형율을 갖는 유동 등에서 더 정확한 해를 제공한다 (ANSYS FLUENT, 2013). 순환팬을 가상공간에 배치함에 있어 순환팬의 유입면

Table 1 Composition of ventilation system for simulating ventilation efficiency on naturally and mechanically ventilated duck houses

	Model	Type	Composition
Naturally ventilated duck houses	A, B, C, D	1	Winch curtain (basic)
		2	Basic + tunnel exhaust fan
		3	Type 2 + circulation fan (10 m intervals)
		4	Type 2 + circulation fan (15 m intervals)
Mechanically ventilated duck houses	A, B, C, D	1	Tunnel exhaust fan (basic)
		2	Basic + circulation fan (10 m intervals)

과 배출면에서의 추적가스 농도를 매 연산마다 동일하게 적용하기 위하여 C언어를 이용하여 u, v, w-momentum, mass continuity 그리고 기타 운송 방정식 등을 하나의 모듈로 구성하였으며 매 연산마다 해당 모듈이 작동되도록 설계하였다. 또한 시설 내 오리의 발열량은 생체중과 온도를 이용하여 식 (3)과 같이 산정하였다 (CIGR, 1984).

$$Q_T = 10m^{0.75} (4 \times 10^{-5} (20 - t)^3 + 1) \quad (3)$$

m : Body mass (kg)

t : Ambient temperature (°C)

벽체온도는 Choi et al. (2008)를 참고하여 벽면에 우레탄 발포 처리를 하지 않은 경우 하절기동안 50 °C까지 상승한다고 가정하여, 이를 모델 설계에 적용하였다. 전산유체역학 시뮬레이션 모델을 위한 경계조건은 Table 2와 같다.

자연환기식 오리사의 경우, 윈치커튼을 통하여 외부 기류가 유입되므로 시설 외부 풍환경을 고려하기 위하여 오리사를 기준으로 풍상측 45 m, 풍하측 250 m, 측면 180 m에 대한 외부영역을 설계하였으며, 풍속에 대한 연직 프로파일을 경계조건으로 적용하였다. 풍속의 연직 프로파일의 경우 식(4)와 같이 프로파일 함수를 적분하여 산정하게 되며 우변의 무차원 함수는 중립의 대기 안정도 상태에서 1의 값을 가진다는

Table 2 Design conditions of CFD simulation model

Classification	Input values		
	Naturally ventilated house	Mechanically ventilated house	
Turbulence model	RNG k-ε		
Density	Incompressible ideal gas		
External wind velocity	1,3 m·s ⁻¹		
Wind direction	Perpendicular to the side wall		
Ambient temperature	26,3 °C		
Initial indoor temperature set	43,3 °C		
Wall temperature	50 °C		
Installed angle of circulation fan	10 °		
Velocity of circulation fan	8,2 ms ⁻¹		
Heat flux by ducks	99,7339 W·m ⁻²		
Tunnel exhaust fan	Capacity	4,061 CMH	7,063 CMH
	Velocity	8,2 m·s ⁻¹	5,7 m·s ⁻¹
	Condition	Velocity inlet (Negative Pressure)	
Slot opening	Pressure inlet		

가정 하에 식(5)과 같은 로그 형태의 풍속 프로파일을 설계하였다. 이 때, 적용된 난류운동에너지 및 난류소산율은 각각 식 (6), (7)와 같다 (Ha, 2015).

$$\frac{kz}{u^*} \frac{du}{dz} = \phi_m \quad (4)$$

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) \quad (5)$$

$$k(z) = \left(\frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}}\right) \quad (6)$$

$$\epsilon(z) = \frac{u^{*3}}{k(z+z_0)} \quad (7)$$

$u, u(z)$: Wind velocity on the height z ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

u^* : Friction velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

k : Von Karman constant (0.4)

C_μ : Empirical constant

ϕ_m : Dimensionless wind profile function

z_0 : Length of surface roughness (m)

나. MFR 및 TGD 환기 분석

대상 오리사 공간 전체와 오리군 영역에서의 환기율을 분석하기 위하여, 바닥으로부터 0.5 m 높이에 각 오리사의 폭과 길이 크기와 같은 격자형태의 가상공간을 오리사 내부에 정의하여 지역적 환기성능을 모의하였다. 질량교체환기량 산정을 위하여 CFD 시뮬레이션에서 모든 환기구의 격자에서 유출·입되는 질량유량을 매초 계산하였으며, 하나의 환기장에서 난류에 의해 유출·입이 동시에 일어나는 현상 또한 고려하였다. 환기구에서 격자들의 절점인 노드에서 질량 유량의 흐름에 대한 방향성을 판별해 유입과 유출을 구분하고 각각의 질량 유량을 산정한 후 면적가중 평균에 의하여 시설 전체에 대한 유입량, 유출량을 도출하였다 (식 8).

$$\frac{1}{A} \int \Phi dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n v_{node_i} |A_i| \quad (8)$$

A : Area of inlet and outlet (m^2)

A_i : Node area (m^2)

v_{node_i} : Velocity at the node ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

n : Number of node at the inlet and outlet

추적가스 감식법을 통하여 시설내부 전체와 지역적 환기율을 계산하기 위하여 추적가스로 사용된 이산화탄소 농도가 초기에 2,000 ppm으로 가득 차있고 대기 중의 이산화탄소 400 ppm이 시설 내부로 유입된다고 가정하였다. 추적가스 감식법을 이용하여 환기량을 산정할 경우 추적가스의 농도가 수렴되는 구간에 대한 기준 선정을 위하여 이산화탄소의 초기농도인 2000 ppm과 대기 중 농도 400 ppm의 차의 2% 값인 432 ppm 이내의 값에 도달하였을 때 각 지점에서의 환기가 완전히 이루어진다고 가정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 자연환기식 오리사 환기 분석

가. 전체 환기율 분석

MFR로 산정한 시설 내부의 전체 환기율은 모든 오리사에서 평균 약 1.14 AER (air exchange rate, 회/min)을 나타냈으나, TGD로 산정한 결과 환기율은 약 0.25 AER으로 MFR과 비교하여 약 22%에 불과한 것으로 나타났다 (Table 3). 이는 Ha (2015)가 언급한 바와 같이 시설 내부의 유동학적 특성을 고려하지 않고 단순히 유출입면에서의 유속으로부터 환기율을 산정한 결과 MFR이 환기율을 과대평가한 것으로 판단된다.

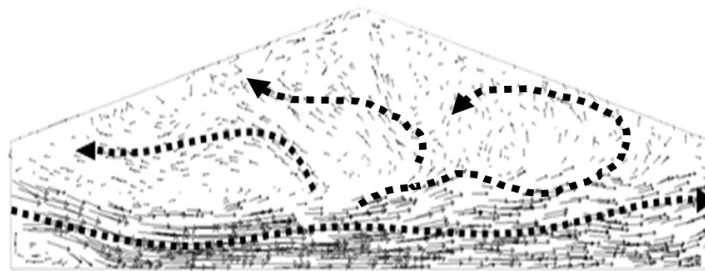
전체 환기율에 있어서 오리사 폭에 따라 다른 경향성을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 폭이 좁은 모델인 오리사 A형은 시설 내부의 순환팬이 설치되지 않은 A-2모델에서 0.07 AER을 나타냈으나 순환팬이 10 m 간격으로 설치될 시 0.52 AER으로 7.4배 높은 환기율을 나타냈다. 이는 Fig. 3과 같이 풍상측으로 유입된 신선한 공기가 풍하측으로 거동함에 따라 시설 상부층에 형성된 가스를 효율적으로 제거하지 못한데서 기인한 것으로 판단된다. 또한 순환팬을 15 m 간격으로 설치하였을 때 0.37 AER으로 순환팬 간격이 멀어짐에 따라 환기율이 약 71% 낮게 나타났다. 이는 설치 간격의 차이로 인하여 동일한 용량의 순환팬이 1대 적게 설치됨에 따라 상부에 형성된 가스를 제거하지 못해 환기율이 상대적으로 낮게 형성되는 것으로 판단된다. 반면 폭이 넓은 모델인 오리사 C형은 Fig. 4와 같이 풍상측에서 유입되는 기류 패턴의 변화와 와류형성에 따른 시설내부 공기의 체류시간이 증가하며, 내부 공기유속이 저하함에 따라 0.18 AER의 환기율로 오리사 A형과 달리 순환팬의 설치유무에 따른 효과가 미미한 것으로 나타났다.

나. 오리군에서의 환기율 분석

오리군에서의 환기율을 분석한 결과 (Table 4), 오리사 A형 모델에서 오리군 환기율은 평균 2.37 AER으로 나타났다.

Table 3 Overall ventilation rate calculated by MFR, and TGD according to ventilation type of naturally ventilated duck houses

Model		Ventilation rate (AER·min ⁻¹)		Model		Ventilation rate (AER·min ⁻¹)	
		MFR	TGD			MFR	TGD
Natural ventilation A type	A-1	1,51	0,08	Natural ventilation C type	C-1	0,68	0,2
	A-2	1,65	0,07		C-2	0,77	0,16
	A-3	1,4	0,52		C-3	0,65	0,18
	A-4	1,48	0,37		C-4	0,72	0,15
Natural ventilation B type	B-1	1,63	0,1	Natural ventilation D type	D-1	0,7	0,22
	B-2	1,78	0,14		D-2	0,8	0,26
	B-3	1,53	0,68		D-3	0,69	0,18
	B-4	1,58	0,57		D-4	0,72	0,16



(a) Ventilation 1 type



(b) Ventilation 3 type

Fig. 3 Incoming airflow in the naturally ventilated duck house C type when the external wind velocity and direction were 1,3 m·s⁻¹ and from west to east, respectively. (a) The maximum wind velocity in duck house was 1,05 m·s⁻¹, minimum was 0 m·s⁻¹ in ventilation 1 type (b) The maximum wind velocity was 4,87 m·s⁻¹, minimum was 0 m·s⁻¹ in ventilation 3 type

Fig. 4(a)에서와 같이 순환팬이 없는 경우, 유입된 기류가 아무런 방해 없이 이동하는 것과 달리 순환팬이 10 m 간격으로 설치됨에 따라 Fig. 4(b)와 같이 배기되는 기류를 방해하여 환기율이 29 % 감소된 1.75 AER을 나타냈다 (Fig. 5). 그러나 순환팬의 설치간격을 15 m로 설정하였을 때는 10 m 간격에 비하여 설치대수가 적어 후류의 영향이 적게 발생하여 배기되는 기류를 혼합하는 효과가 적어, 오히려 환기율이 1.98 AER으로 10 m 간격보다 약 13 % 높게 나타났다. 지역적 환기율의 편차는 순환팬이 설치되지 않은 A-2모델에서 12.3 %로 비교적 균일성이 높게 나타났으나 순환팬을 설치함에 따

라 62.4 %로 약 5.1배 환기 불균일성이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 폭이 넓은 모델 (C, D형) 중 C형의 경우 앞선 전체 환기율의 경향과 유사하게 오리군에서의 지역적 환기율의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 또한 환기율의 지역적 편차는 순환팬을 설치하지 않을 때 47.7 %였던 반면 10 m 간격으로 순환팬을 설치하였을 때 68 %로 크게 나타났다. 이는 순환팬이 없는 오리사 A형 모델과 비교하여 3.9배 높은 지역적 환기 편차를 나타냈는데, 폭이 넓어짐에 따라 발생하는 오리군에서의 유입기류의 유속저하가 지역적 환기 불균일성을 높이는 것으로 판단된다.

Table 4 Local ventilation rate (TGD) and variation coefficient at a height of a flock of duck according to ventilation type of naturally ventilated duck houses

Model		Ventilation rate (AER · min ⁻¹)		Model		Ventilation rate (AER · min ⁻¹)	
		Height of duck	Variation Coefficient (%)			Height of duck	Variation Coefficient (%)
Natural ventilation A type	A-1	2,45	17	Natural ventilation C type	C-1	1,49	55,7
	A-2	2,37	12,3		C-2	1,53	47,7
	A-3	1,75	62,4		C-3	1,57	68
	A-4	1,98	46,7		C-4	0,91	71,2
Natural ventilation B type	B-1	2,0	16,7	Natural ventilation D type	D-1	1,5	54,7
	B-2	2,02	16,7		D-2	1,53	26,4
	B-3	1,59	44,8		D-3	1,57	66,6
	B-4	1,85	39,6		D-4	0,9	54,9

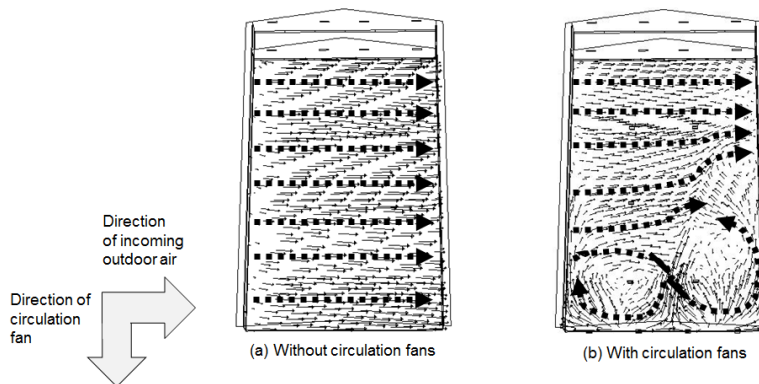


Fig. 4 Internal airflow at the height of rearing zone in the duck house C type when the external wind velocity and direction were $1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and from west to east, respectively. The maximum wind velocity in duck house was $1,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, minimum was $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The maximum wind velocity was $2,46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, minimum was $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

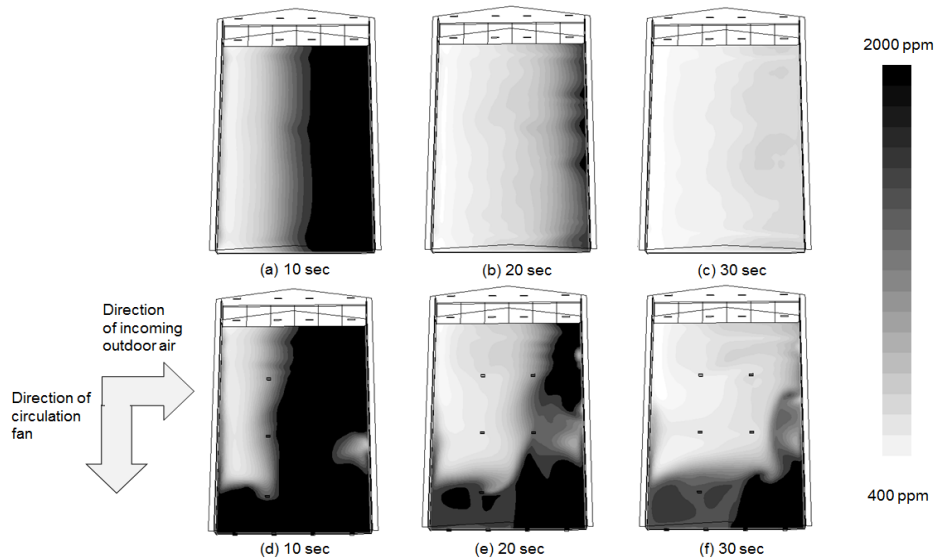


Fig. 5 Concentration change of tracer gas at 10 second intervals at a height of a flock of duck without circulation fans ((a)~(c)) & with installation of circulation fans ((d)~(f)) in C type naturally ventilated duck house when the external wind velocity and direction were $1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and from west to east, respectively

Table 5 Designed ventilation rate and overall ventilation rate calculated by MFR and TGD methods according to installation of circulation fan in mechanically ventilated duck house

Model		Ventilation rate (AER·min ⁻¹)		
		Designed ventilation rate	MFR	TGD
Mechanical ventilation A type	A-1	0,37	0,38	0,13
	A-2	0,37	0,37	0,12
Mechanical ventilation B type	B-1	0,35	0,36	0,12
	B-2	0,35	0,36	0,12
Mechanical ventilation C type	C-1	0,27	0,27	0,08
	C-2	0,27	0,29	0,10
Mechanical ventilation D type	D-1	0,25	0,26	0,10
	D-2	0,25	0,26	0,10

2. 강제환기식 오리사 환기 분석

가. 전체 환기율 분석

자연환기식 오리사와 유사하게 강제환기식 오리사에서도 MFR로 계산한 환기율이 TGD로 계산한 환기율보다 2.7~3.0 배 높게 나타났다(Table 5). TGD를 이용하여 계산한 강제환기식 오리사 내부 전체환기율은 규격별로 0.13, 0.12, 0.08, 0.10 AER을 나타냈으며, 순환팬이 10 m 간격으로 설치된 경우 규격별로 0.12, 0.12, 0.10, 0.10 AER을 나타내어, 오리사 전체의 환기효율성에 대한 순환팬의 효과는 미미한 것으로 판단되었다. 이는 구조적 설계단계에서부터 각 오리사에 설치된 터널 배기팬의 총 용량을 오리사 체적으로 나눔으로써 손쉽게 환기율을 산정하는 설계 환기율이 각 모델별 약 0.25~0.37 AER으로 하절기에 권장되는 최소 환기율인 분당 1회를 만족시키지 못하는 약 31 % 수준에 불과하기 때문인 것으로 판단된다 (Fanzic Inc., 2012).

나. 오리군에서의 환기율 분석

강제환기식 오리사 내부 오리군에서의 환기율을 분석한 결과 (Table 6), 순환팬이 설치되지 않은 경우, 규격별로 0.14, 0.12, 0.10, 0.11 AER을 나타냈으며, 순환팬이 10 m 간격으로 일정하게 설치된 경우 0.13, 0.12, 0.10, 0.10 AER으로 나타났다. 유동장을 분석한 결과, 순환팬을 통하여 기류가 벽에 부딪히고 터널 배기팬의 위치부에서 주 기류방향과 반대방향의 유동을 가짐으로써 환기율이 미소하게 감소하는 것으로

Table 6 Local ventilation rate (TGD) and variation coefficient at a height of a flock of duck according to installation of circulation fan in mechanically ventilated duck house

Model		Average Ventilation rate (AER·min ⁻¹)	
		Height of duck	Variation coefficient (%)
Mechanical ventilation A type	A-1	0,14	7,93
	A-2	0,13	4,72
Mechanical ventilation B type	B-1	0,12	6,74
	B-2	0,12	5,86
Mechanical ventilation C type	C-1	0,10	5,23
	C-2	0,10	2,98
Mechanical ventilation D type	D-1	0,11	4,56
	D-2	0,10	6,14

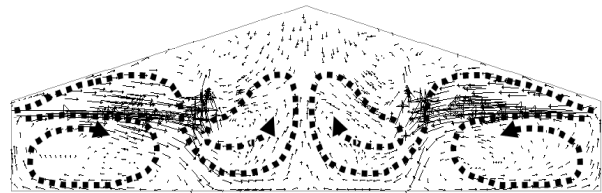


Fig. 6 Incoming air flow pattern through slot opening on the wall of duck house. The maximum wind velocity was 6.83 m·s⁻¹, minimum value was 0 m·s⁻¹

나타났다. C와 D형 오리사의 경우 상대적으로 넓은 폭을 고려하여 시설 내부의 순환팬을 2열로 설치하였으나, 순환팬에서 배기되는 강한 기류에 의하여 기류패턴이 Fig. 6과 같이 나타남에 따라 오리사 내 중앙지역 환기율이 주변 지역보다 상대적으로 낮게 형성되는 것을 알 수 있었다.

강제환기식 오리사 내부에 순환팬이 설치되지 않은 경우, 입기슬롯을 통하여 유입되는 기류가 중앙부분으로 집중되어 약 0.36 AER으로 높은 환기율을 나타내었으며, 측벽으로 갈수록 지역적 환기율이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 넓은 폭을 고려하여 순환팬이 2열로 설치된 C와 D형의 오리사에서는 순환팬에서 배기되는 강한 기류에 의하여 측벽에서 유입되는 기류가 차단되어 오리군 높이 중앙부분에서의 환기 성능이 상대적으로 좋지 못한 것으로 나타났다. 이는 순환팬에 의한 기류와 입기슬롯을 통해 유입되는 기류가 직교함으로 인하여 일부 구간에서 정체 발생하는 것으로 나타났다 (Fig. 7).

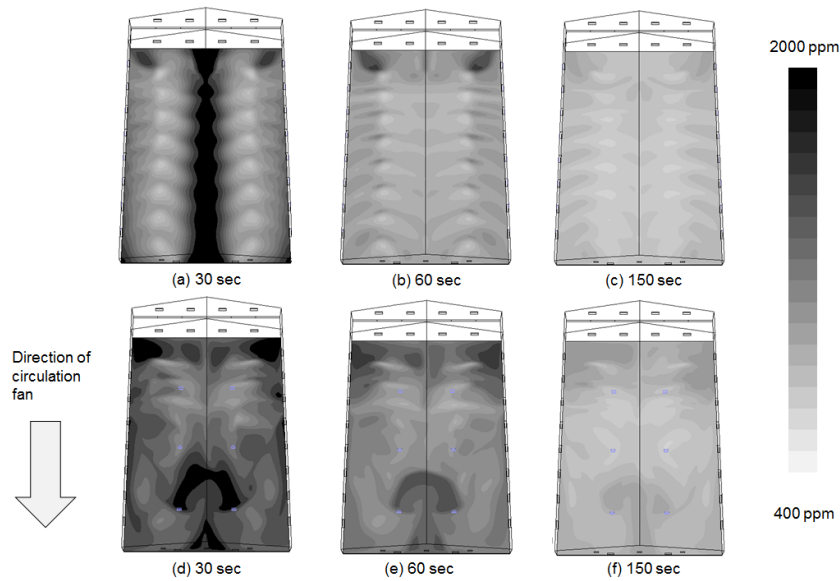


Fig. 7 Concentration of tracer gas at 30, 60, 150 sec at a height of a flock of duck without circulation fans ((a)~(c)) & with installation of circulation fans ((d)~(f)) in C type mechanically ventilated duck house

IV. 결 론

축산과학원에서 제시한 표준 오리사 설계안을 분석하기 위하여, CFD를 사용하여 하절기 오리사 전체 및 오리군에서의 환기효율성을 분석하였다. 좁은 모델인 오리사 A형은 시설 내부의 순환팬이 설치되지 않은 A-2모델에서 0.07 AER을 나타냈으나, 순환팬을 10 m 간격으로 설치한 경우, 0.52 AER으로 7.4배 높은 환기율을 나타냈다. 반면 폭이 넓은 모델인 오리사 C형에 순환팬을 설치한 경우, 유입되는 기류의 변화와 난류에 따라 내부공기 유속이 저하함에 따라 0.18 AER의 환기율을 나타냈다. 오리군에서의 환기율의 경우, 오리사 A형 모델에서 평균 2.37 AER으로 나타났다. 순환팬을 10 m 간격으로 설치한 경우, 배기되는 기류를 방해하여 환기율이 29% 감소된 1.75 AER을 나타냈다. 지역적 환기율은 순환팬이 설치되지 않은 A-2모델에서 12.3%로 균일성이 높게 나타났으나, 순환팬을 설치함에 따라 62.4%로 약 5.1배 불균일성이 증가하는 것으로 나타났다. 폭이 넓은 모델의 경우 전체 환기율과 유사하게 오리군에서의 환기율 차이는 미미한 것으로 나타났다.

강제환기식 오리사 전체 환기율은 순환팬을 설치하더라도 그 효과는 미미한 것으로 나타났다. 이는 구조 설계단계에서부터 설계 환기율이 모델별로 약 0.25~0.37 AER으로 권장 최소환기율의 약 31%에 불과하기 때문이다. C와 D형 오리사의 경우 상대적으로 넓은 폭을 고려하여 순환팬을 2열로 설치하는 경우, 양쪽 입기슬롯으로부터 유입되는 공기가 순환팬

의 강한 기류에 의하여 기류가 변형되어 중앙으로 집중되지 못하여, 중앙부분에서의 환기율이 상대적으로 낮게 형성되는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 CFD 모델링 기법을 효율적으로 활용하여 축산과학원에서 제시하고자하는 오리사 설계안에 대한 문제점을 예측하고, 보완이 필요한 사항을 확인할 수 있었다. 이와 같이 설계 기준 제시에 앞서 구조에 따라 예상되는 공기유동, 열환경, 환기율 등에 대한 분석은 시공 및 유지 관리 단계에서 뿐만 아니라 에너지 투입 비용 또한 절감시킬 수 있어 농가 소득향상에 도움이 될 것으로 예상된다. 추가적으로 순환팬의 설치 시 환기 성능 저하가 발생하지 않도록 설치 용량, 대수, 각도 등에 대한 모의가 요구된다.

REFERENCES

1. ANSYS Fluent. 2013. ANSYS Fluent tutorial guide, version 15.0. Pennsylvania, U.S.
2. Bjerg, B., K. Svidt, G. Zhang, S. Morsing, and J.O. Johnsen, 2002. Modelling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses. *Computers and Electronics in Agriculture* 34: 223-234.
3. Bjerg, B., P. Liberati, A. Marucci, G. Zhang, T. Banhazi, T. Bartzanas, G. Cascone, I.B. Lee, and T. Norton, 2013a, Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings: Part 2, air change modelling *Biosystems*

- Engineering* 116: 246-258.
4. Bjerg, B., G. Cascone, I.B. Lee, T. Bartzanas, T. Norton, S.W. Hong, I.H. Seo, T. Banhazi, P. Liberati, A. Marucci, and G. Zhang, 2013b, Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. Part 3: CFD modelling *Biosystems Engineering* 116: 259-275.
 5. Choi, H. L., 2008. Study on incidence of respiratory disease according to the configurations of structural and ventilation system using aerodynamic approaches, 38-39. National Institute of Animal Science (NIAS) (in Korean).
 6. CIGR, 1984. Climatization of animal houses. Craibstone, Aberdeen, Scotland.
 7. Fanzic, Ventilation plan and design. [Http://fanzic.com](http://fanzic.com). Accessed 20 Jul. 2012.
 8. Ha, J.S., 2015. Evaluation of natural ventilation efficiency of protected cultivation system in reclaimed land using aerodynamic simulation. MS. diss., Seoul National University, Seoul, South Korea.
 9. Hong, S.W., I.B. Lee, H.S. Hwang, I.H. Seo, J.P. Bitog, J.I. Yoo, K.S. Kim, S.H. Lee. K.W. Kim, and N.K. Yoon, 2008. Numerical simulation of ventilation efficiencies of naturally ventilated multi-span greenhouse in Korea, *Transactions of the ASABE* 51: 1417-1432.
 10. Hwangbo, J., E.C Hong, B.S. Lee, H.D. Bae, S.J. Lee, S.B. Cho, H.K. Kim, J.H. Kim, B.S. Park and J.I. Song, 2006. Effect of ventilating system on the performance of broiler chicks in an environmental controlled cage house. *The Korean Society of Poultry Sciences* 33(1): 57-63 (in Korean).
 11. Lee, I.B., S. Sase and S.H. Sung, 2007. Evaluation of CFD accuracy for the ventilation study of a naturally ventilated broiler house. *JARQ* 41(1): 53-64.
 12. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MFAFF). 2012; 2014. The amount of production of agriculture, forestry and livestock industry and production index. [Http://mafra.go.kr](http://mafra.go.kr). Accessed 24 Jun. 2015.
 13. Norton, T., J. Grant, R. Fallon, and D. Sun, 2010. Optimising the ventilation configuration of naturally ventilated livestock buildings for improved indoor environmental homogeneity, *Building and Environment* 45: 983-995.
 14. Rural Development Administration (RDA). 2011. Operation manual to enhance agricultural income. [Http://rda.go.kr](http://rda.go.kr). Accessed 24 Jun. 2015.
 15. Sapounas, A., J.B. Campen, M.C.J. Smits, and H.J.C. van Dooren. 2009. Simulating the effect of forced pit ventilation on ammonia emission from naturally ventilated cow houses with CFD. *The 4th European conference on Precision Livestock Farming*.
 16. Seo, I.H., I.B. Lee, O.K. Moon, H.T. Kim, H.S. Hwang, S.W. Hong, J.P. Bitog, J.I. Yoo, K.S. Kwon, Y.H. Kim, and J.W. Han, 2009. Improvement of the ventilation system of a naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulation, *Biosystems Engineering* 104: 106-117.
 17. Song, S.H., I.B. Lee, K.S. Kwon, T.H. Ha, J.P. Bitog, S.W. Hong, I.H. Seo, O.K. Moon, Y.J. Kim, and E.J. Choi, 2012. Analysis of the disease spread in a livestock building using tracer gas experiment, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54: 37-45 (in Korean).
 18. Wu, W., G. Zhang, E. Bjerg, and P.V. Nielsen, 2012. An assessment of a partial pit ventilation system to reduce emission under slatted floor-Part 2: Feasibility of CFD prediction using RANS turbulence models. *Computer and Electronics in Agriculture* 83: 134-142.