

강제환기식 돈사의 환기 효율성 분석을 위한 CFD 모델 개발

Development of a CFD Model to Study Ventilation Efficiency of Mechanically Ventilated Pig House

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

Il-hwan Seo* · In-bok Lee[†] · Se-woon Hong · Hyun-Seob Hwang · Jessie Pascual Bitog
Jae-in Yoo · Kyung-suk Kwon · Tae-hwan Ha · Hyeon-tae Kim**

Abstract

When livestock facilities in Korea have been changed larger and denser, rearing conditions have been getting worse and the productivity of animal production have been decreased. Especially in the cold season, the minimized ventilation has generally been operated to save energy cost in Korea resulting in very poor environmental condition and high mortality. While the stability, suitability, and uniformity of the rearing condition are the most important for high productivity, the ventilation configuration is the most important to improve the rearing condition seasonally. But, it is so difficult to analyze the internal air flow and the environmental factors by conducting only field experiment because the weather condition is very unpredictable and unstable as well as the structural specification can not be easily changed by the researchers considering cost and labor. Accordingly, an aerodynamic computer simulation was adopted to this study to overcome the weakness of conducting field experiment and study the aerodynamic itself. It has been supposed that the airflow is the main mechanism of heat, mass, and momentum transfers. To make the simulation model accurately and actually, simplified pig models were also developed. The accuracy of the CFD simulation model was enhanced by 4.4 % of errors compared with the data collected from field experiments. In this paper, using the verified CFD model, the CFD computed internal rearing condition of the mechanically ventilated pig house were analyzed quantitatively as well as qualitatively. Later, this developed model will be computed time-dependently to effectively analyze the seasonal ventilation efficiency more practically and extensively with tracer gas decay theory.

Keywords : CFD, Mechanical ventilation, Pig house, Ventilation efficiency

1. 서 론

최근 축산물의 생산력 증대와 가격 경쟁력 향상을

위하여 축산 시설의 대형화와 밀집화가 이루어지는 추세에 있다. 돼지의 경우 1,000두 이하의 소규모 사육 비율이 10년 전의 56%에서 2007년 3월 현재 19%로 현저히 감소한 것이 이를 나타내고 있다(NAQS, 2007). 그러나 대형화된 축산시설에서 주요 환경인자들의 균일성 및 적정성을 유지하는 것은 매우 어려운 일이며, 밀집사육으로 인하여 시설 내에 과도하게 집적되는 먼지, 미생물, 유해가스 등의 오염물질

* 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학

** 성균관대학교 생명공학부 바이오메카트로닉스공학

[†] Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4586

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: iblee@snu.ac.kr

은 가축의 질병 면역력 약화와 사육 및 작업환경의 악화를 가져왔다. 이에 따라 돼지의 폐사율은 해마다 증가세를 유지하며, 조사된 바에 따르면 2006년 12월에는 약 14.6%로 여전히 높은 실정이다(SSLI, 2006). 이러한 질병 문제의 해결을 위하여 돼지 사육환경의 적정성, 안정성 및 균일성의 향상이 요구되고 있으며, 특히 온도, 습도 등 기본 환경인자만을 고려하는 것이 아니라, 호흡기성 질병 발생과 연관이 깊은 먼지 및 유해가스 등을 인위적으로 감소시킬 수 있는 환경조절 시스템 개발이 필요하다. 특히 동절기의 경우, 연료비 절감을 위하여 최소 환기량을 유지하기 때문에 축사 내의 사육환경은 매우 열악한 실정이다.

이러한 연구를 위해서는 다양한 환경조건 하에서 내부 환경의 변화를 분석할 필요가 있으며, 특히 눈에 보이지 않는 공기유동 및 이의 환기효율성을 비교 분석할 필요가 있다. 그러나 현장실험을 통하여 돈사 내의 사육환경 조건을 정량적으로 분석하기에는 많은 비용과 노력 및 시간이 요구되고 또한 인위적으로 자연환경조건을 제어하기 어려운 문제가 있다. 또한 환기 작용의 주 메커니즘인 공기 유동을 가시적으로 분석하기에는 한계가 있다. 이러한 현장실험의 한계를 극복하기 위하여 Herral et. al.(1997), Bjerg et. al.(2002), Lee et. al.(2002), Sun et. al.(2002, 2004) Lee et al.(2007) 등은 축사 시설 내에서의 환기 효율성 및 공기 유동을 정량적으로 분석하기 위하여 전산유체역학 시뮬레이션(Computational fluid dynamics)을 사용한 바 있으며, 최근에는 시설 내에서의 열과 물질 이동 등의 현상을 고려한 시뮬레이션에 관심이 모아지고 있다(Norton et. al., 2007). 이러한 공기유동학적 접근을 통하여 다양한 시스템의 효율성을 정성적 및 정량적으로 비교 분석할 수 있으며, 적정 환기 구조 설계를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 동절기 돈사의 환기 구조적 문제점을 파악하고 이의 향상을 도모하기 위해서 이용될 수 있는 공기유동학적 시뮬레이션 모델 개발에 목표를 두었다. 본 연구에서 이용된 공기유동학적 모델은 전산유체역학(computational fluid dynamics)의 대표적 상용화 모델인 Fluent(Fluent Inc. N.H., USA)이

었다. 본 연구의 첫 번째 단계로 기본적인 3차원 CFD 시뮬레이션 모델을 설계하였고, 동시에 현장 실험을 수행하여 CFD 시뮬레이션 모델의 정확도 검증 및 이의 향상을 도모하였다. 또한 개발된 CFD 모델을 이용하여 기존 돈사내부의 환기효율성 분석을 수행하였다. 본 연구는 농림부 농림기술개발연구과제 ‘축사용 습식 공기정화시스템 개발(2006.4~2008.4)의 지원으로 수행되었다.

II. 재료 및 방법

1. 시뮬레이션 툴

시뮬레이션 툴은 크게 기본적인 구조적 모델을 만들고 이의 계산 영역 내에 격자(mesh)를 설계하는 프리프로세서와 계산 영역을 바탕으로 공기 유동학적 계산을 수행하고 또 이를 분석하는 메인 모듈로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 3D-Max, CAD 등의 그래픽 프로그램을 이용하여 돈사의 기본 구조와 돼지 모형을 기초 설계하였으며, 전산유체역학(Computational fluid dynamics)의 프리프로세서인 Gambit (ver. 2.3. Fluent Inc. N.H., USA)을 사용하여 3차원 격자망 모델로 설계하였다. Gambit은 GUI(Graphical user interface)를 기반으로 하여 기본적인 외형과 유한개의 3차원의 격자망 형성에 사용된다. Gambit의 장점은 육면체 또는 사면체의 격자를 형성할 때, 복잡한 지형에서 격자 크기와 모양 등이 부드럽게 이어지도록 적절한 수준의 격자크기 비율을 조절하는데 있다. 또한 유체의 유동문제 해결능력의 향상을 위하여 다양한 격자 설계 방법을 제공하여 격자를 유연하게 설계하도록 도와준다. 격자는 시뮬레이션의 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 요인 중 하나이므로 설계 시 형태가 안정적이어야 한다. 이를 판단하기 위하여 각 격자들의 왜곡도를 식(1)과 같이 Equiangle skew 공식을 통하여 분석함으로써 격자 설계의 완성도를 판단할 수 있다. 6면체의 경우 0.85, 4면체의 경우 0.9를 넘지 않아야 결과의 데이터 신뢰도가 충분히 높은 것으로 가정하였다(Fluent manual, 2006).

$$Q_{EAS} = \max \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right] \quad (1)$$

θ_{\max} : 면이나 격자의 가장 큰 각
 θ_{\min} : 면이나 격자의 가장 작은 각
 θ_e : 면이나 격자의 등각(삼각형의 경우 60도, 사각형의 경우 90도)

Fluent(ver. 6.2. Flunet Inc. N.H., USA)는 CFD 연산을 수행하는 상용 프로그램으로 C++ 언어를 기반으로 만들어졌으며 동적인 메모리 할당과 효율적인 데이터 구조와 유연한 계산 제어를 가능하게 제작된 CFD 기반의 컴퓨터 모델링 및 분석 툴이다. Fluent는 계산 영역내의 모든 격자들에 대하여 Navier-Stokes 방정식의 레이놀즈 이론의 개념을 계산하기 위하여 질량, 운동량, 에너지 보존법칙을 미소의 체적에 적용하여 얻어진 비선형 연립 편미분방정식을 통하여 유체 및 에너지의 이동현상을 해석한다.

CFD 시뮬레이션의 현실성을 높이고 정확도를 향상시키기 위해서는 난류 현상을 충분히 고려하여야 한다. 현재 모든 종류의 문제에 대하여 포괄적으로 사용할 수 있는 난류 모델은 존재하지 않기 때문에 각 모델에서의 물리적인 특성과 문제의 특성, 요구되는 정확도의 정도, 시뮬레이션에 소요되는 시간 등을 고려하여 난류 모델을 결정해야 한다. 이번 연구에서 사용된 난류 모델은 RNG κ - ϵ model 이다. Lee et al.(2007)은 축산 시설 등을 대상으로 한 풍동 및 PIV 실험을 통하여 확보한 시설내 공기유동장 데이터를 전산유체역학 시뮬레이션 결과와 비교분석함으로써 RNG κ - ϵ turbulence model이 가장 높은 신뢰도를 가지는 것으로 주장하였으며, 구체적인 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (3)$$

G_k : 평균 속도 구배에 의한 난류 동적 에너지의 생성
 G_b : 부력에 의한 난류 동적 에너지의 생성
 Y_M : 전체 확산에서 압축성 난류의 변동하는 팽창의 정도
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$: 각각 k 와 ϵ 의 난류 Prandtl 수
 $\alpha_k, \alpha_\epsilon, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$: 상수

2. Tracer gas decay 방법

습식 공기정화기의 성능을 비교 분석하기 위하여 Tracer gas decay 이론을 사용하여 환기 효율성을 분석하였다. 식 (4)와 같이 들어오는 공기와 나가는 공기의 양을 산술적으로 계산하는 기존의 환기량 계산 방법은 시설 전체의 공기 유출입을 통하여 전체적인 평균 환기량을 산출하기 때문에 지역적인 환기량과 유해 가스 및 분진의 정화 효과를 적절하게 분석하기가 어려웠다. 이를 극복하기 위하여 본 연구에 도입한 Tracer gas decay 방법은 식 (5)와 같이 시간의 변화와 농도의 변화간의 관계를 정량적으로 분석하여 환기량을 계산하는 방법이다. 실험의 대상이 되는 공간 내부에 CO₂, NO₂ 등의 특정한 가스를 균일하게 채워 넣은 후 환기가 수행되는 동안의 농도의 변화를 측정함으로써 전체의 환기량은 물론 지역적인 환기 효과를 분석할 수 있다. Tracer gas decay 방법을 현장에서 사용할 경우, 초기의 가스 농도를 균일하고 안정적으로 분포시키는 것이 어렵고 외부의 환경적인 요소를 실험자가 임의대로 조절할 수 없는 어려움이 있다. 또한 점 측정에 의존하기 때문에 지역적 환기 효과를 분석하기가 어렵다. 그러나 전산유체역학을 통한 공기유동학적 시뮬레이션을 사용할 경우 초기 가스 농도와 환경적인 요소 등을 실험자의 요구에 맞게 안정적으로 설정할 수 있으며, 방대한 양의 데이터를 통하여 다양한 분석을 도출할 수 있는 장점이 있다.

$$AER_{conventional} = \frac{\sum v_i A_i}{V} \times 60 = \frac{\sum v_o A_o}{V} \times 60 \quad (4)$$

$$AER_{TGD} = \frac{\ln(C_b/C_i)}{t-t_0} \quad (5)$$

AER : 환기량(air change rate, min^{-1})
 v_i, v_o : 환기창에서의 유입과 유출 속도($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 A_i, A_o : 유입 및 유출이 일어나는 환기창의 면적(m^2)
 C_0 와 C_t : t_0 와 t 시간에서의 가스 농도(mass fraction = gas volume/air volume)

3. 실험 방법

시물레이션은 현장 실험의 어려움을 극복하고 이를 보완하기 위한 방법이므로 현장 실험을 통하여 시물레이션 모델의 정확도를 검증하는 작업은 중요한 과정이다. 본 연구에서는 온습도 센서, 암모니아 측정기, 적외선 표면 온도계, 다채널 풍속계 등을 사용하여 돈사의 내부와 외부의 온도와 습도 분포의 실시간 변화, 시설 내 지역별 암모니아 농도, 각 벽체 및 돼지의 표면 온도, 환기량 등을 측정하였다. 이 데이터들을 현재 실제 돈사에서 동절기 동안 발생하는 문제점들을 정확하게 이해하고 또한 개발된 CFD 3차원 모델의 정확도를 검증하는데 이용하였다.

가. 현장실험

현장실험은 충청북도 충주시 살미면 문강리에 소재한 약 700두 규모의 농장에서 2006년 12월 27일, 28일 이틀간 실시하였다. 강제환기식 실험돈사의 길이와 폭은 각각 73 m와 14 m이며, 동절기동안에는 크로스 환기방식을 적용하고 있다. 돈사 내부의 환기는 (1)과 같이 남쪽 측벽과 지붕 사이의 입기구를 통하여 유입된 공기가 돈사 내부를 순환한 후 북쪽의 배기식 덕트나 측벽의 배기팬을 통하여 배기되는 구조이다. 하절기의 경우 측벽 유입구 바로 아래의 폭 1 m의 유도판을 사용하여 돈군에 신선한 외부공기가 도달할 수 있도록 설치되며, 동절기에는 외부의 찬공기가 돈군에 도달하기 전에 상부의 따뜻한 공기와 혼합될 수 있도록 유도판이 지붕과 평행하게 설치된다. 하절기에는 측벽에 위치한 총 8개의 배기팬들과 길이방향으로 균일하게 배치된 배기식 덕트가 동시에 가동되며, 동절기에는 가변식 팬이 설치된 굴뚝 덕트만 작동하게 된다. 동절기 동안은 에너지 비용 등을 고려하여 최소환기가 이루어진다.

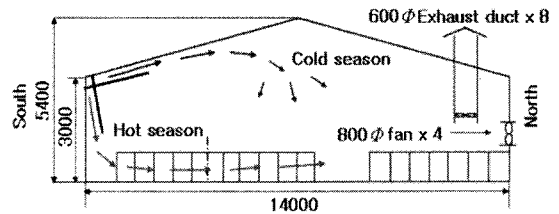


Fig. 1 Seasonal ventilation systems of the experimental pig house located at Choongju, Choongnam-province, Korea (Unit: mm)

돈사 내부 구조 및 데이터 수집을 위한 센서 설치 위치는 (2)와 같다. 실험용 강제환기식 돈사내 돈방은 총 3열로 각 열에 18개가 있으며, 열에 덕트가 설치되어 있다. 측정 지점은 돈사 중앙으로부터 좌우로 약 10 m 간격으로 균일하게 선정하였다. 각 돈방에는 약 80 kg의 육성돈이 평균 14마리씩 사육되고 있었다. 농장내 작업자들이 작업을 하는데 방해가 되지 않도록 센서를 설치하여야 하기 때문에 연구자가 원하는 지점에 충분히 센서를 설치하는 것은 매우 어려웠고, 기존의 급이 급수시설 라인들을 최대한 활용하여 센서들을 설치하고자 노력하였다. 온습도 센서(Hobo, Onset Corp, Southern MA, USA)는 돈방내부에 바닥으로부터 약 1 m 높이에 설치하였다. 외기의 온습도 측정을 위하여 시설 외부에 온습도 센서를 추가로 설치하였으며, 직사광선이 직접 온습도 센서에 도달하지 않도록 처마 아래에 센서를 설치하였다. 또한 모든 온습도 센서는 일정한 온습도 환경 조건 하에서 예비 실험을 통하여 측정값을 비교하여 보정하였으며, 매 1분 간격을 데이터를 측정하였다.

시설 내부 각 벽체 및 돼지의 피부 온도를 측정하기 위하여 표면온도계(Raynger MX4, Raytek, USA)를 사용하였으며, 각 대상별로 5번의 반복측정을 하여 이를 평균한 값을 이용하였다. 바닥에서 발생하는 암모니아 가스의 농도 및 시설 내부에서의 암모니아 농도를 측정하기 위하여 암모니아 가스 측정기(PAC III, Dräger, Germany) 2대를 사용하였고, 매 10초 간격으로 데이터를 측정하였다. 열선풍속계(Kanomax, JP/SYSTEM 6243, Japan)를 이용하여 각 배기구에서의 풍량을 측정하였고 측정된 데이터와 축사내의 부피를 고려하여 환기량을 예측하였다.

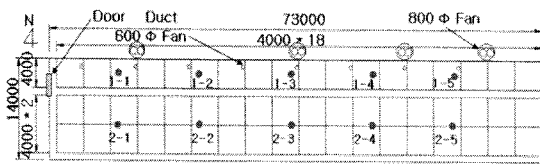


Fig. 2 A plane figure of pig house and locations of sensors installed (An exit is located at the left side toward the north)

● : HOBO sensors
c : Exhaust ducts (Unit : cm)

나. CFD 시뮬레이션 설계

3차원 시뮬레이션 모델의 설계는 크게 모델의 구조 설계와 시뮬레이션 설계로 이루어진다. 모델의 구조 설계는 CFD 상용 프로그램 중에 하나인 Gambit을 사용하였다. CFD 시뮬레이션에 사용된 돈사의 모델은 폭 14 m, 전체 길이 73 m로 설계하였으며, 돈방은 18개씩 3열로 각각 4 m × 4 m로 설계하였다. 돈사의 기본 구조 및 환기 구조는 실제와 같은 방식으로 설계하였고, 돼지 모형은 복잡한 형상을 나타내고 있기 때문에 효율적인 연산시간과 결과의 정확도를 종합적으로 고려하여 기본적인 환기 구조를 유지하는 범위 내에서 단순화시켜 설계하였다. 추후 연구를 위하여 돈사의 환기 구조는 동절기와 하절기에 따라서 축창의 유입방법을 서로 다르게 적용할 수 있도록 설계하였으며, 덕트나, 배기용 팬, 출입구의 개폐 등을 임의로 조절할 수 있도록 설계하였다. 격자의 구성은 계산 시간을 최대한 단축시키고, 정확도를 최대한 증가시키기 위하여 안정적인 6면체(hexahedron mesh) 구조를 주로 사용하였으며, 돼지가 각각 12마리씩 있는 돈방의 경우 구조가 복잡하여 4면체(tetrahedron mesh) 구조를 사용하여 격자망을 구성하였다. 또한 결과에 중요한 영향을 끼치는 유입구와 배기구, 장치 설치부 등을 다른 지역보다 더 조밀하게 설계하여 계산 시간을 단축시킴과 동시에 정확도를 향상시키는 구조가 되도록 약 232만개의 격자망을 설계하였다.

Gambit으로 설계한 격자망 모델은 Fluent 메인 모듈을 사용하여 초기 경계값과 환경조건, 난류 방정식 등을 적용하여 시뮬레이션 연산을 수행하게 된다. 시뮬레이션 설계 시 사용한 가정들은 다음과 같다.

- 1) Tracer gas decay 방법을 적용하기 위하여 돈사 내부에는 공기와 암모니아 이외의 가스는 없는 것으로 가정한다.
- 2) 가스나 입자 등의 화학적인 반응에 의한 생성이나 응집 등은 없는 것으로 가정한다.
- 3) 환경 조건은 현장에서 측정된 값을 사용하였다.
- 4) 슬러리에서 발생하는 악취 및 수분은 바닥에서 발생하는 것으로 가정한다.
- 5) 돼지에서는 온도만이 발생하는 것으로 가정한다.
- 6) 습식 공기정화기를 통하여 암모니아는 완전 제거 되는 것으로 가정한다.
- 7) 공기는 비압축성 이상기체로 가정한다.

외부 및 내부의 환경 조건은 현장 실험을 통하여 얻은 데이터를 바탕으로 하였으며, 계산의 정확도에 큰 영향을 주는 난류 모델의 경우 Lee et al.(2007)에 의하여 축산 시설에서 가장 신뢰도가 높은 것으로 알려진 RNG $k-\epsilon$ model을 사용하였다. 3차원 CFD 시뮬레이션의 결과의 정확도를 향상시키기 위하여 현장실험 결과를 토대로 검증을 수행하였다. 시뮬레이션 검증은 Fluent 프로그램을 사용하였으며 비정상상태를 가정하였다. 설정한 초기 조건은 현장실험 결과 외기상이 비교적 안정적이었던 12월 27일 오후 2시에서 3시 사이의 데이터를 토대로 이루어졌다. 표면온도계를 사용하여 현장에서 측정된 각 벽체 및 돼지의 표면 온도 데이터와 온습도 센서를 사용하여 측정된 외기 온도 등을 초기 환경 조건으로 설정하였으며, 같은 기간의 내부 온도 데이터와의 비교를 통하여 시뮬레이션 모델의 검증을 수행하였다. 또한 현장에서 측정된 덕트의 유속을 바탕으로 하여 돈사내 부피가 약 10.9분에 한번 교체되는 것으로 가정하였다. 또한 현장실험 결과를 바탕으로 돈사의 바닥의 슬러리에서부터 40 ppm의 농도의 암모니아와 상대습도 100%의 수분이 확산하는 것으로 가정하여 시뮬레이션 하였다. Table 1은 3차원 CFD 모델의 초기 환경 조건을 나타낸 것이다.

실험 돈사의 환기 시설은 음압식 환기로서 남쪽 측벽의 상단부에 폭이 약 0.2m 인 유입구를 통하여 유입되는 외부 공기가 덕트의 팬을 통하여 배기되는

Table 1 Input data of the 3-dimensional CFD model used for this study

Contents		Values
Temperature	North and West wall	13.7℃
	South and East wall	16.5℃
	Corridor floor	13℃
	Partition for pig room	16℃
	Floor of pig room	20.6℃
	Surface of pig	40℃
	Roof	18.3℃
	Outside of pig house	6.2℃
Humidity	Floor of pig room	0.013572 kg · m ⁻³
	Outside of pig house	0.004353 kg · m ⁻³
Ammonia concentration	Floor of pig room	40 ppm
Ventilation rates(air exchanges)		0.0918 min ⁻¹

구조를 가지고 있다. 그러나 실제로는 양 끝 벽의 출입문들의 틈새를 통하여 유입되는 공기의 영향이 크기 때문에 이를 충분히 고려할 필요가 있었다. 특히 양 쪽 출입문을 통하여 유입되는 공기는 돈사 전체의 온도 균일성에 큰 영향을 미치게 되므로 이를 다공성 매체(Porous medium)로 가정하여 공기유입량을 설정하였다. 다공성 매체는 기존의 유체 흐름을 구현하는 공식에 운동량항(Momentum source term)을 추가함으로써 구현된다. 이 운동량항은 Darcy의 공식에 의한 점성력 손실(Viscous loss term)과 내부 손실(Inertial loss term)로 구성되어 있으며 유체의 압력장에 영향을 미쳐 각 격자에서의 유속에 비례하는 압력의 저하를 생성하여 감소된 유량이 흐르도록 유도한다.

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho v_{mag} v_j \right) \quad (6)$$

S_i : i번째 모멘텀 공식의 source term,

D, C : 계산을 위한 Matrix 이다.

v_{mag} : 유체 유속의 크기

완성된 3차원 CFD 모델은 현장실험 결과와의 비교를 통하여 정확도를 분석하고 이를 향상시키고자 노력하였으며, 검증된 모델을 바탕으로 기존 돈사 내부

의 환기효율성 분석을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 현장실험 결과

Fig. 3에서 보여주듯이, 측정시간 동안 외기 온도는 7.0 ~ -5.8℃의 분포로 시간에 따라 낮아지는 경향을 보였다. 시설 내부의 온도는 27일 오후 4시경에 17.9 ~ 21.8℃로 최고 온도를 보였으며, 이후 외부온도와 같이 꾸준히 낮아져서 4월 28일 오전에 10.6 ~ 16.8℃로 최저 온도를 나타냈다. 돼지의 적정 설정 설정온도이며, 또한 자동 온도조절 장치에 설정 온도이었던 21℃에 훨씬 못 미치는 환경이었으며(SSL, 2006), 이는 돼지의 식욕감퇴 및 호흡기성 질병 발생을 유발할 수 있는 위험한 상태이었다. 특히, 관리자가 출입을 하지 않는 밤 사이에 매우 열악한 환경조건이었음을 알 수 있었다. Fig. 4에서는 시설 내부의 상대 습도 변화를 보여주고 있는데, 4월 27일

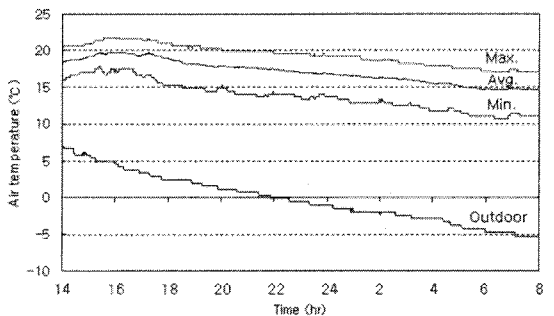


Fig. 3 Temperature variation at measuring points and outdoor

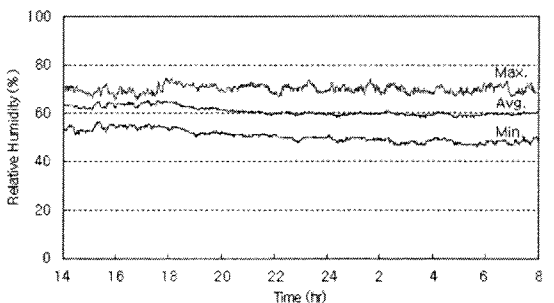


Fig. 4 Humidity variation at measuring points and outdoor

오후 6시 이후에 센서의 위치에 따라 53~73%로 나타났다. 이 때 외기의 상대습도는 50~76%로 27일 저녁에 가장 높게 나타났으며, 이후 점차 낮아져서 4월 28일 아침에 가장 낮게 나타났다. 외부에 설치된 습도센서의 오류로 인하여 외기 상대습도는 충주 기상청 데이터를 활용하였다.

축사내 공기 온도는 환기시스템에 따른 공기유동에 따라서 측벽의 유입구 쪽이 더 낮게 나타났으며, 특히 끝벽에 설치되어 있는 출입구 부근의 돈방에서 온도가 현저히 낮게 나타났다. 이는 출입구의 틈새바람으로 인한 것으로 Fig. 5에서와 같이 육안으로 확인이 가능할 정도의 틈새를 통하여 많은 양의 찬 외기가 유입되고 있는 것을 나타내고 있다. Fig. 6에서 보여 주듯이, 이는 돼지들의 움직임을 통하여서도 확인할 수 있었다. Fig. 6과 같이 출입문에 근접한 곳에 위치한 돈방에는 돼지들이 체온 유지를 위하여 활동을 거의 하지 않고 모여서 누워있는 반면에 적절한 온도가 유지되고 있는 돈사의 중앙부에 위치한 돈방의 돼지들은 활발하게 움직이며 사료를 먹는 것을 볼 수 있었다. 측벽의 유입구 쪽에 돈방에서 다른 지역에 비하여 상대적으로 낮은 온도가 감지되었는데, 이번 연구를 통하여 개발된 전산유체역학(CFD) 모델을 통한 시설내 공기유동을 통하여 정확한 원인 분석이 이루어졌다. 이에 대한 설명은 이 논문의 후반부에서 CFD 결과들과 함께 소개되었다.

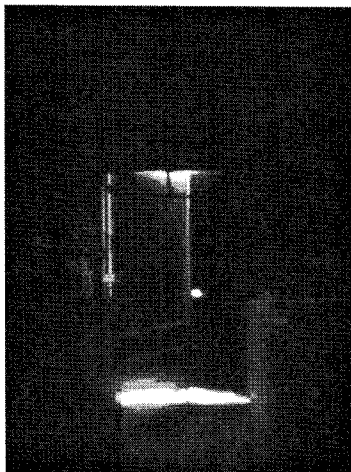


Fig. 5 Door located at a end wall causing unexpected air-infiltration



Fig. 6 Pigs near the indoor and at the center of the pig house

시설 내부의 표면온도는 총 3회에 걸쳐서 측정하였다. 표면 온도 측정 시 필요한 각 재료의 방사율(emissivity) 값은 콘크리트 0.95, 철재 0.8, 유리 0.85 등의 값을 각각 사용하였으며, 돼지의 경우는 0.85~0.95의 다양한 값을 적용시켰으나 방사율에 따른 온도 차이가 거의 나타나지 않았다. 측정된 결과는 Table 2에서 보여주는 바와 같다. 이 데이터들은 전산유체역학 시뮬레이션 모델 개발 시 입력 데이터로 이용되었다.

Table 2 Surface temperatures measured by infrared gun (unit : °C)

Material	Avg. temp.	No. of samples	STD	Material	Avg. temp.	No. of samples	STD
Pig	34.4	66	2.4	Ceiling	18.3	19	1.6
Side wall(left)	16.5	20	2.1	Side wall(right)	15.7	20	0.8
End wall(x-5)	16.5	18	1.5	End wall(x-1)	13.7	14	0.5
Floor (middle aisle)	13.0	22	1.5	Floor (right aisle)	10.3	24	2.8
Floor(center pig-room)	20.6	16	4.9	Floor(right pig-room)	18.9	17	5.4
Inner wall	16.0	20	1.9	Entrance door	8.9	16	0.3
Small door	5.4	17	0.5	Window	6.9	13	0.0

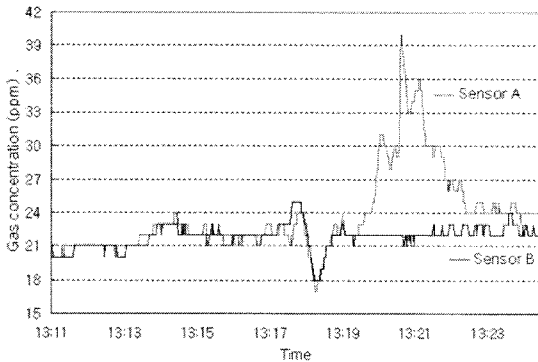


Fig. 7 Variations of ammonia concentration at floor(sensor A) and 1m height(sensor B)

암모니아 가스 측정은 측정기 2대를 이용하여 돈사 내부의 바닥으로부터 약 1 m 높이에서와 바닥에서 발생하는 암모니아 가스의 농도를 각각 측정하였다. 바닥에서 1 m 높이에서의 암모니아 가스 농도는 두 센서에서 평균 약 21.8 ppm으로 측정되었다. 12월 27일 오후 1~2시 사이에 하나의 센서를 바닥높이에서(Fig. 7 sensor A), 다른 하나는 1 m 높이에서(Fig. 7 sensor B) 각각 실시간으로 측정하여 비교한 결과, 바닥 높이에서 최고 40 ppm까지 측정되었으며, 평균 약 32 ppm으로 1 m 높이보다 약 10 ppm 더 높은 것으로 나타났다. 에너지 부하 등을 고려하여 최소환기가 이루어지고 있는 동절기에 일반적으로 돈사내 악취농도가 매우 높게 형성되는 것은 당연한 결과이다. Wathes와 Charles(1994)는 돼지의 경우 25 ppm을 최대 허용 농도로 규정하고 있는데, 이번 실험 돈사내 암모니아 농도는 이와 비교하여 매우 높은 것으로 판단되었다.

2. 시뮬레이션 모델링 결과

CFD 시뮬레이션 모델을 만드는 과정은 크게 Gambit을 사용한 구조 설계와 Fluent를 사용한 시뮬레이션 환경 조건의 설계로 나눌 수 있다. CFD 설계에 따른 모델 정확도는 대표적으로 격자설계, 난류모델, 환경 조건 설계 등 중요한 요인들이 있다(Lee et al., 2007). Gambit을 사용한 격자망의 설계는 구조를 다수의 부피로 만든 후 이를 적절한 간격과 모양의 격자로 나눈 후 최종적으로 경계 조건(Boundary condition)

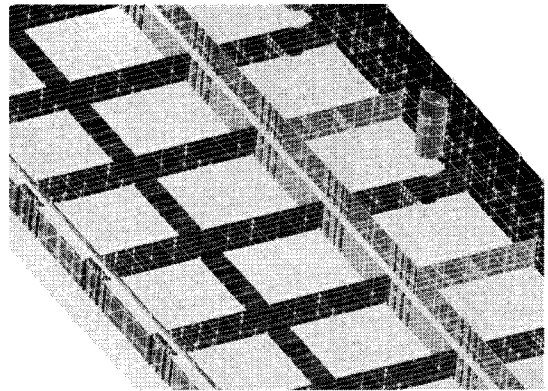


Fig. 8 Volume sections of the 3-dimensional CFD simulation model of the experimental pig house using Gambit ver 2.2.30

을 지정하여 주는 과정을 거치게 된다. 때문에 구조를 형성하기 전에 설정할 경계 조건을 미리 생각하여 기급적 많은 수의 독립된 계산 영역으로 나누어 설계하는 것이 양질의 격자를 최대한 조밀하게 설계하고 또한 연산 작업을 수월하게 하는 방법이다. 이번 돈사 모델에는 외벽과 환기구, 출입구를 비롯하여 내부에 복잡한 경계 조건(복도, 돈방, 철창, 덕트, 습식공기정화장치, 환기구, 순환팬 등)을 설정하기 위하여 내부 공간을 Fig. 8과 같이 많은 수의 계산 영역으로 나누어 설계하였다.

덕트와 지붕의 경우는 각각 원기둥과 삼각기둥 형태로 설계할 경우 부피의 제작에는 큰 문제가 발견되지 않지만, 직육면체와 원기둥이 만나는 부분에서 격자의 연결이 잘 되지 않는 문제가 종종 발생한다. 따라서 원기둥들의 윗면과 아랫면의 원 부분을 인접한 직육면체들의 사각평면과 연결되도록 하기 위하여 4개의 선분의 합으로 나누어 설계하였다. 이를 통하여 원기둥과 직육면체의 연결부의 격자 작업의 효율성이 향상되는 결과를 보였다. 이와 같은 방법을 사용하여 작성된 격자를 Table 3과 같이 구성되었다.

Table 3 Designed computational domain using Gambit

Size	14 m width × 73 m length × 5.2 m height
Shapes of meshes	Hex-Map, Hex/Wedge-Cooper, Tet/Hybrid - Tgrid
Number of meshes	about 2.32 million meshes

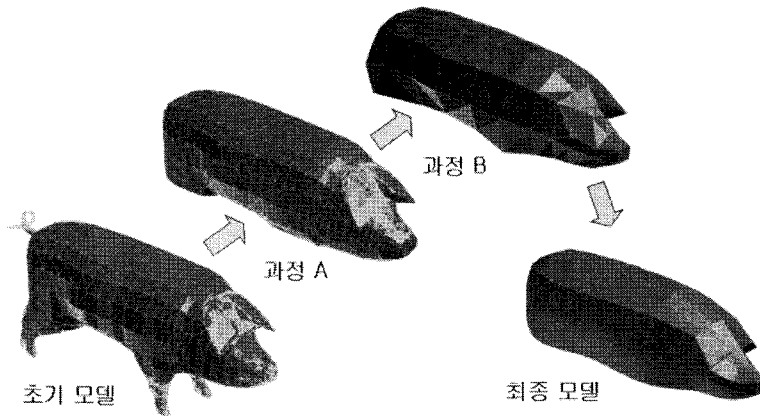


Fig. 9 Process of pig simplification for CFD simulation

이전에 수행된 유사한 CFD를 이용한 환기 연구들의 경우 보통 축사 내에 동물이 없는 것으로 가정하여 구조만을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다(Harral et al., 1997; Bjerg et al., 2002; Lee et al., 2002). 그러나 이 경우 동물에 의하여 발생하는 유동장의 변화나 체열 및 수분의 발생 등을 효과적으로 나타내지 못하였다. 따라서 이번 CFD 시뮬레이션에는 돼지를 포함한 모델을 설계하였다. 돼지의 경우 다리, 귀, 코, 꼬리 등이 매우 사실적으로 상세히 표현되어 있는 모델을 사용하여 격자를 설계할 경우, 제한된 영역에 많은 격자수가 필요하게 된다. 그러나 본 연구가 돈방 하나를 대상으로 하는 것이 아니라 넓은 돈사 전체를 대상으로 하기 때문에 이처럼 상세한 묘사를 사용할 경우 공학적으로 실용적인 시뮬레이션에 적합하지 않을 것으로 판단되었다. 따라서 돼지의 다리와 꼬리 등을 생략한 단순화한 모델을 사용하는 것이 적절하다고 판단하였으며, Fig. 9는 이번 연구에서 돼지의 간략화 과정을 나타낸 것이다. 초기 모델의 다리와 꼬리 등을 제거하여 간략화 시킨 모델을 만들어 54개의 돈방에 각각 약 12마리의 돼지를 넣어 최종 시뮬레이션 모델을 만들었다. 그러나 이 경우 Fig. 9의 과정 A의 돼지 모형과 같이 삼각형의 격자들이 모여 전체 계산 영역을 형성하기 때문에 얼굴 부분과 같이 격자가 조밀하게 형성된 부분에서 왜곡도가 기준치를 넘어서는 경향을 보였다. 이는 돼지를 넣은 돈방 하나를 기준으로 하였을 때, 돈방 외

부의 격자 간격에 비하여 돼지의 표면의 격자 간격이 약 1/100 정도로 작기 때문에 기준을 초과하는 적절하지 못한 결과를 보였다. 따라서 이를 해결하기 위하여 과정 (2)와 같이 격자의 간격을 몸통의 경우 약 4배, 얼굴의 경우 약 8배 정도 크게 하였다. 이를 통하여 왜곡도의 기준을 초과하지 않고 돼지를 적용할 수 있었다. 그러나 Gambit 프로그램상의 문제로 설계한 데이터가 저장되지 않는 문제가 발생하였다. 격자의 설계과정에는 문제가 없으나 이를 저장할 경우 프로그램이 다운되는 현상이 반복되어 발생하였다. CFD 시뮬레이션 모델 설계에 사용된 컴퓨터는 Double CPUs 컴퓨터(Pentium IV 3.0 GHz, 4 GB memory)로 계산 수행에 충분하다고 판단되며, 이 같은 문제는 면, 선 등의 정보가 너무 많기 때문이라는 결과를 내리게 되었다. 과정 B의 돼지 모델 하나의 경우 약 300여개의 선과 약 120개의 면 정보를 가지고 있으며, 돈사 전체에 약 620여 마리의 돼지를 넣을 경우 약 186,000개의 선 정보와 약 74,400개의 면 정보가 추가로 소요되는데 이는 일반적인 모델에 비하여 굉장히 많은 양이다. 따라서 과정 C와 같이 기존 모델의 3차원 좌표 정보를 활용하여 3차원적인 평면을 만들어 획기적으로 선과 면의 수를 줄일 수 있었다. 간략화 시킨 돼지 모델을 돈방에 적용한 결과 왜곡도를 조절하는데 훨씬 유용하였고 또한 총 격자수를 30% 정도 줄이는 효과가 있었다.

3. 시뮬레이션 모델의 검증

현장 실험을 통하여 얻은 온도 데이터 중 비교적 균일하다고 판단되는 4월 27일 오후 2시에서 3시 사이의 현장실험 결과와 시뮬레이션의 결과 중에서 센서가 설치된 위치와 동일한 위치에서의 온도 데이터를 비교함으로써 시뮬레이션 모델의 정확도를 검증하고자 하였다. 첫 번째로 내부의 환경 조건을 현장의 조건과 동일하게 한 후, 2시에서 3시 사이의 외기온도의 평균인 6.2°C의 공기가 측창과 양 끝의 출입구를 통하여 유입되도록 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 초기 결과에서 센서가 설치된 1.2 m 높이에서의 온도 데이터를 현장실험의 온도 데이터와 비교한 결과 평균 약 4.4°C 더 낮은 온도를 나타냈다. 이는 현장에서는 측창의 유입구로 차가운 외부 공기가 바로 들어오지 못하도록 비닐로 막아 두기 때문에 공기가 비닐과 입기구 사이에 형성된 공간에서 외부 공기보다 약 4°C 정도 온도가 상승되어 내부로 들

어오는 것으로 확인되었다. 이와 같은 현상은 추후의 현장실험에서 직접 지점별로 측정하여 확인을 하였다. 따라서 측창에서 유입되는 공기의 측사의 길이별 온도분포를 UDF(User defined function)을 사용하여 측창의 양 끝부분에서 가운데로 갈수록 온도가 외부 온도보다 약 4°C 정도까지 점차 높아지도록 설정하여 시뮬레이션에 적용하였다. 그 결과 현장실험의 온도 데이터와의 차이가 평균 약 0.8°C까지 근접하였으며, 현장의 환경조건이 불안정, 불균일한 상태임을 감안하였을 때, 공학적으로 상당한 수준까지 정확도를 향상시킨 것으로 판단되었다. Fig. 10에서는 Fig. 2에서 보여주는 센서들의 각 위치에서의 온도 비교를 보여주고 있다.

4. 돈사 내부의 환기효율성 비교 분석

실험 농장은 측창에서 유입되는 공기가 돈사 내부를 순환하여 팬이 설치된 덕트를 통하여 배기되는 음압식 환기 시스템을 사용하고 있다. 또한 측창 바로 아래 지붕방향으로 1 m 폭의 유도판을 두어 Fig. 11과 같이 지붕방향으로 공기가 유입되어 상층부의 따뜻한 공기를 통하여 온도가 상승된 후 돈군으로 내려가 유해가스와 함께 외부로 배출될 것을 기대하였다. 그러나 이러한 구조는 B 지점으로 환기를 집중시키므로 상대적으로 A 지점의 환기 효과가 미비해질 수 있기 때문에 환기 구조적으로 완벽한 구조는 아니라고 판단되었다. 이와 같은 환기 구조상에서는 B 지점이 A 지점보다 상대적으로 온도가 낮을 것으로 예상되었으나, 현장에서 측정한 결과 오히려 A 지점이 B 지점보다 온도가 훨씬 낮은 결과를 보였다. 이는 동절기에 내부의 온도가 급격히 떨어지는 것을 감안하여 환기량을 최소로 하기 때문에 유입구인 측벽 입기구에서의 공기 유입속도가 미비하게 된다. 이로 인하여 유입되는 공기흐름이 돈사의 중앙부까지 뻗어나가지 못하고, 또한 환기가 지속될 경우 Fig. 11에서와 같이 중앙부에 반시계방향의 와류가 형성되어 유입되는 공기를 A 지점 방향으로 밀어 내리게 된다. 이로 인하여 차가운 무거운 공기가 돈사 중앙부까지 퍼지지 못하고 바로 측벽을 타고 돈군으로 떨어지는 현상을 보였다. 이는 돈사 내부의 균일

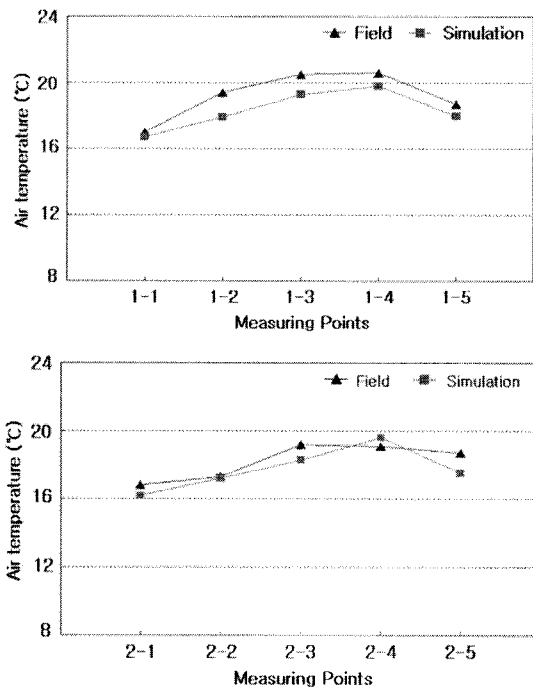


Fig. 10 Comparison of the averaged air temperatures in the pig house measured at the field experiment and computed by the 3-dimensional CFD simulation

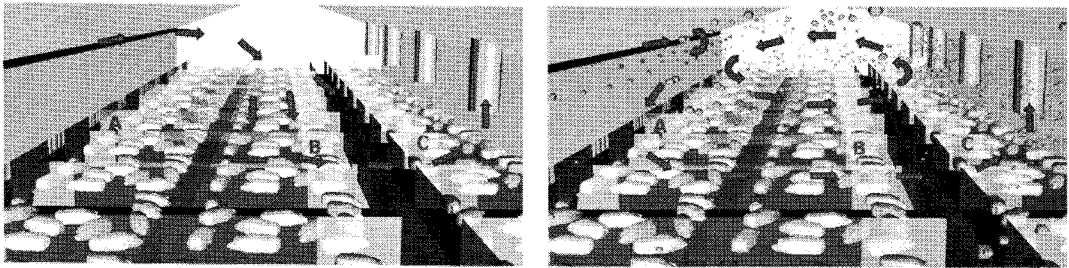


Fig. 11 Ideal(left) and real(right) air flow distribution of the pig-house computed by the CFD simulation

성과 안정성을 저해시키고 또한 온도의 편차를 증가시켜 적정성 유지에 어려움을 겪을 것으로 판단되었다. 농장 운영자가 제시한 폐사 데이터를 확인한 결과 약 70% 이상의 폐사율이 이 지역에서 발생한 것으로 나타났으며, 또한 다른 지역에 비하여 증체율도 매우 떨어지는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 시간에 따라서 온도의 변화를 돼지 높이와 센서가 설치된 1.2 m 높이에서 나타낸 것이다. 내부의 온도분포가 대칭형이 이루어지지 않는 이유는 양쪽 끝벽에 위치한 출입문의 크기와 틈새의 크기가 서로 달랐으며, 또한 현장실험을 통하여 풍상측에 노출되어 있는 왼쪽 출입문을 통하여 더 많은 찬 바람이 유입되었기 때문이다. 양쪽의 출입구와 측창을 통하여 유입되는 차가운 공기는 상대적으로 밀도가 높기 때문에 바닥 부근으로 떨어져서 퍼지게 되었다. 따라서 측벽의 유입구와 양쪽 출입구 근처 돈방에 온도가 다른 지역에 비하여 약 3~4도 가량 낮은 것으로 나타났으며, 돼지의 증체율이나 폐사율이 이곳에서 집중적으로 발생할 것으로 판단되었다. 내부의 온도가 25℃일 때 환기를 시작한다고 가정하여 120 초 동안 환기를 수행시킨 시뮬레이션의 결과, 돼지 높이에서의 온도는 평균 19.1℃로 120초 동안 약 5.9℃ 만큼 평균 온도가 떨어졌다. 이는 돈사의 2 m 높이에서의 평균 온도인 20.9℃와 비교하여 1.8℃ 더 낮은 결과로 환기로 인하여 찬 바람이 바닥에 더 큰 영향을 주기 때문으로 판단되었다. 또한 돼지 높이에서의 온도 편차는 최대 약 14.6℃로 온도의 균일성 뿐 아니라 안정성에도 문제가 나타났다. 이처럼 동절기에 너무 오랫동안 환기를 시킬 경우, 측벽의 유입구와 양쪽 출입구 근처 돈방을 중심으로 발생하는 급격한 온도 차이가 발생하여 돼지에게 커다란 스트레스 요

인으로 작용하기 때문에 돈군 사육환경의 적정성 및 균일성을 매우 악화시키며 폐사율을 증가시키는 큰 요인으로 작용할 것으로 판단되었다. 일반적으로 축사의 경우 환기 작동은 ON/OFF 형태로 운영이 되

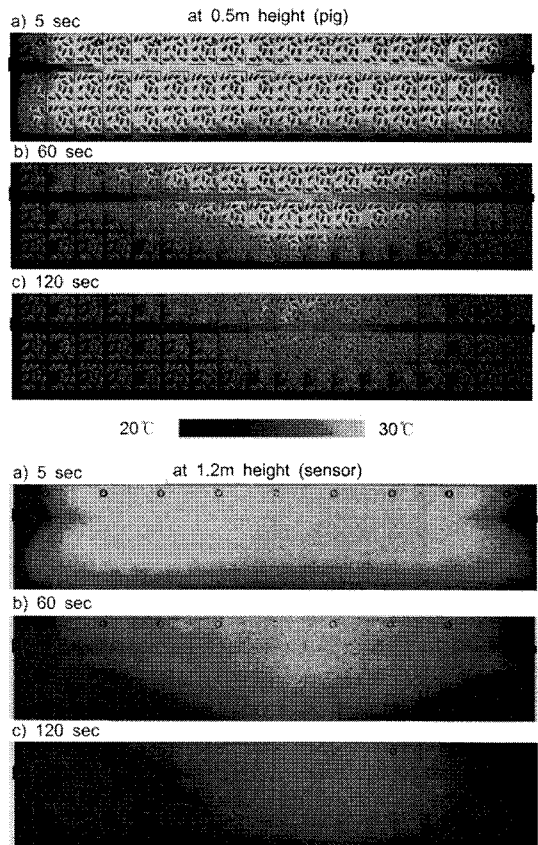


Fig. 12 Changes of internal air temperature distribution at 1.2m height and 0.5m height at 5, 60 120 sec after the ventilation started. bottom line is inlet vent openings while the outlet chimneys are located at the upper part

는데, 이번 연구의 결과로 보면 환기가 작동되는 시간은 짧고 자주 수행하는 것이 좋다는 결과를 보여주었다. CFD 시뮬레이션의 결과 각 작동시간은 30초를 넘지 않는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

Fig. 13과 같이 돈사 전체의 암모니아 농도 평균은 시간에 따라 지수적으로 감소하는 결과를 보였다. 이는 Tracer gas decay를 사용하여 환기량을 계산할 수 있는 근거로 판단된다. 공기의 유출입을 통한 기존의 환기량 계산 방법에 따르면 돈사의 환기량은 0.0918 min^{-1} 이다. 그러나 Tracer gas decay 방법으로 계산한 돈사 전체의 환기량은 0.0513 min^{-1} 이었다. 이는 기존의 계산법에 의한 환기량의 실제 환기 효율성은 약 56%에 불과한 것을 보여주고 있으며, 이는 기존의 환기량 계산 방법이 실제 환기효율성을 나타내는데 어려움이 있고 또한 실제 수행되는 환기의 정도를 측정하기 위하여 한계가 있음을 보여주고 있다. Lee et. al(2007)에서는 기존 환기량 계산 방법보다 Tracer gas decay방법의 더 높은 정확도를 보여주고 있다. Lee 등은 환기 수행 시 시설내 공급되는 공기량 자체가 중요한 것이 아니라 시설내에 오염된 공기가 얼마나 신선한 공기와 교체되는지가 중요하다고 주장하였다. Fig. 14는 Tracer gas decay

방법으로 계산한 돼지 높이에서의 지역적 환기 효과를 나타낸 결과, TGD 방법으로 계산된 돈사 전체의 환기량보다 최대 36% 평균 약 18% 더 높은 것으로 나타났다. 이는 유입된 찬 공기가 바닥에 집중되어 돈군에서의 환기효율성을 더 높이는 것을 알 수 있었다. 또한 지역적으로 환기의 효율성이 약 38%의 차이를 보여 지역적인 환기의 균일성이 부족한 것으로 나타났다.

III. 결과 및 고찰

본 연구를 통하여 강제환기식 돈사의 사육환경 특히 환기를 정량적으로 연구할 수 있는 전산유체역학(CFD) 3차원 모델을 개발하고자 하였다. 특히 돈사 내 돼지를 설계 추가함으로써 실제 상황에 더욱 가까운 모델을 만들고자 노력하였다. 이전의 연구들과 같이 축사의 시뮬레이션 모델에 동물을 배제할 경우, 동물에 의한 유동장의 변화, 체열 및 수분발생 등을 효과적으로 나타내는 것이 어려워지기 때문이다. 이번 연구에서는 돼지의 모델을 시뮬레이션에 적용하고, Tracer gas decay method등 다양한 기술을 적용함으로써 시뮬레이션 결과의 정확도를 향상시키고 현실성을 높일 수 있었다.

완성된 모델은 현장실험의 결과를 바탕으로 타당성을 검증하였으며, 온도도의 경우 오차가 약 4.1%로 나타났다. 검증된 모델을 사용하여 돈사 내부의 환기 효율성을 Tracer gas decay 법을 사용하여 계산하였다. 그 결과 기존의 계산법에 의한 환기량은 실제 이루어지고 있는 환기량의 약 56%에 불과한 것으로 나타났으며, 특히 지역적으로 많은 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 돼지 높이에서의 환기효율성은 지역적으로 약 38%의 차이를 보여 지역적인 환기의 균일성이 부족한 것으로 나타났다. 또한 눈에 보이지

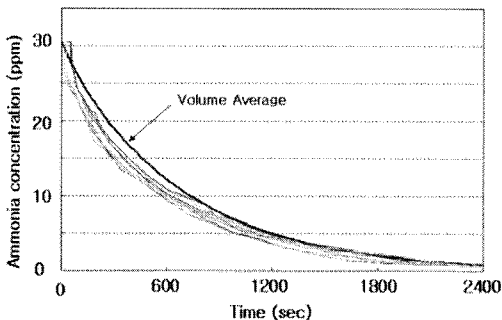


Fig. 13 Changes of CFD computed locally averaged ammonia concentrations in the pig house

c	0.086	0.095	0.095	0.095	0.092	
	0.094	0.097	0.097	0.096	0.093	Volume
	0.095	0.096	0.097	0.096	0.092	0.089

Fig. 14 Regional ventilation rates computed by tracer gas decay method at the pig zone (unit : air exchanges, min^{-1})

않는 내부의 공기유동을 정성적 및 정량적으로 가시화함으로써 돼지의 사육환경에 문제점들의 원인 파악이 가능하였다.

이 연구를 통하여 전산유체역학(CFD) 3차원 모델은 돈사의 사육환경 연구에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단되며, 특히 연구자가 인위적으로 자연 기상상태, 사육시설 및 돈군의 상태 등을 바꾸어 가면서 다양하게 상대비교가 가능할 것으로 판단된다. 또한 원인분석을 가능하게 함으로써 해결책 도출에도 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

Reference

1. Bjerg, B., K. Svidt, & G. Zhang. 2002. Modeling of air inlets in CFD prediction of air-flow in ventilated animal houses. *Computers and Electronics in Agriculture* 34. pp. 223-235
2. Fluent manual, 2006, Version 6.2.2. Lebanon, N.H. Fluent Inc.
3. Harral, B. B., & C. R. Boon. 1997. Comparison of predicted and measured air flow patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals. *J. Agric. Eng. Res.* 66. pp. 221-228
4. Lee, I., W. Park, & B. Yu. 2002. Optimum design of forced ventilation system of piglet house using computer simulation. Presented at the 2002 ASAE annual international meeting. ASAE paper number : 024109. St. Joseph. Mich. :ASAE
5. Lee, I. 2007. Evaluation of CFD accuracy for the study on ventilation of a naturally ventilated broiler house. *JARQ*
6. NAQS, National agricultural products quality management service, 국립농산물품질관리원 <http://www.naqs.go.kr>
7. Norton, T., D. Sun, J. Grant, R. Fallon, & V. Dodd. 2007. Applications of computational fluid dynamics(CFD) in the modelling and design of ventilation systems in a agricultural industry : A review. *Bioresource Technology*.
8. Statistical Survey of Livestock Industry(SSL). 2006. NAPQMS(National Agricultural Product Quality Management Service), Korea.
9. Sun, H., R. Stowell, H. Keener, D. Elwell, & F. Michel. 2002. Two-dimensional computational fluid dynamics modelling of air velocity and ammonia distribution in a high rise hog building. *Transactions of the ASAE* 45, pp. 1559-1568
10. Sun, H., H. Keener, W. Deng, & F. Michel. 2004. Development and validation of 3-D CFD models to simulate airflow and ammonia distribution in a high-rise hog building during summer and winter conditions. *Agricultural Engineering International : the CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript BC 04 004. Vol. VI.
11. Wathes, C. M. & D. R. Charles. 1994. *Livestock Housing*. Cab International. UK