전산유체역학 기법을 이용한 돈사 내 습식 공기 정화기의 적정 위치 설계

Analysis on the Optimum Location of an Wet Air Cleaner in a Livestock House using CFD technology

권경석* · 이인복*,† · 황현섭* · J. P. Bitog* · 홍세운* · 서일환* · 최지선* · 송상현* · 문운경**

Kwon, Kyeong-seok* · Lee, In-bok*,† · Hwang, Hyun-Seob* · Bitog, Jessie. P.*

Hong, Se-Woon* · Seo, Il-Hwan* · Choi, Ji-sun* · Song, Sang-Hyeon* · Moon, Oun-Kyung**

ABSTRACT

In South Korea, as the living standard has been getting higher, meat consumption is steadily increasing. To meet the country's demand, livestock houses become larger and wider with increased raising density. In larger livestock houses, pollutants such as flake of pig skin, excrement, odor, various dusts and noxious gas like ammonia are excessively accumulated inside the facility. These will cause weak immunity for the pigs, diminution of productivity and degeneration of working condition. These problems can be solved through the ventilation performance of the facility. In the winter time, ventilation must be controlled to minimum to maintain a suitable thermal condition. However, this affects the other internal environmental condition because of the minimum ventilation. The installation of "wet air cleaner" especially in the winter time can be an alternative solution. For efficient application of this machine, there is a need to understand the existing ventilation condition and analyze the interaction of existing ventilation system with the wet air cleaner considering its appropriate location. In this study, the existing ventilation system as well as the internal environmental condition negatively inside the facility with the wet air cleaner has been studied using CFD technology. The CFD simulation model was validated from the study conducted by Seo et al. (2008). Results show that the elimination rate of ammonia was 39.4 % and stability could be improved to 35.1 % (Comparing case 5 to 1 where wet air cleaner machine was not used). It can therefore be concluded that case 5 shows the optimum location of a wet air cleaner in the livestock house.

Keywords: Computational fluid dynamics; Livestock house; Wet air cleaner; Ventilation

I. 서 론

생활수준의 향상 및 식생활 습관의 변화에 따라 국내의 돈육 소비량은 1998년 1인당 15.1 kg에서 2008년 19.1 kg으로 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다 (한국 육류유통 수출입협회, 2008). 국내 축산업자들은 규모의 경제 원리에 따라 축산 시설의 대형화 및 밀집 사육을 통하여 축산물의 생산력 증대 및 가격 경쟁력 제고를 도모하고 있다. 그러나 대형화 및 밀집 사육은 사료, 동물의 피부 박편, 털, 분변 등으로 인한 각종 먼지나 미생물, 유해 가스 등이 시설 내부에 과도하게 집적되는 상황을 야기한다 (Seo et al., 2008). 대표적인 유해 가스 중

암모니아는 피트에 존재하는 돈분의 혐기성 발효로 인하여 생성되며 그 유해성에 관하여 국내·외에서 활발히 연구 된 바 있다. Ferbman (1992)는 돼지가 암모니아에 노출될 경우 삼차 신경계 및 후각 신경계에 자극을 받게 되며 이는 혈관 확장, 결막 출혈 및 그로 인한 점액 분비 증가, 호흡량 감소를 유발한다고 보고하였다. Jones et al. (2000)은 돈사 내 암모니아 농도가 20ppm을 초과하면 돼지의 신경계를 자극 혹은 교란시킨다고 보고하였다. Bang et al. (1998)에 따르면 암모니아가 먼지 입자에 흡착될 경우 돼지와 마찬가지로 인간의 폐 심부에까지 도달할 수 있으며 이는 두통, 구토 및 식욕 저하 등의 증상을 유발하며 고 농도의 암모니아를 장시간 흡입하게 될 경우 기도의 점액이나 이물질을 제거하는 선모를 손상시킬 수 있다고 보고하였다. 또한 Lee et al. (2005)은 암모니아 농도가 20 ~ 50 ppm일 경우 돼지의 시각, 후각 신경을 자극한다고 보고하였다. 따라서 암모니아는 가축의 질병 면역력 약화 및 이로 인한 폐사율 증대, 작업자의 근로 조건 악화를 초래하고 있으며 이는 곧 농가의 경제적 손실을 유발하는 원인으로 작용한다고 판단할 수 있다.

* 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 & 농업생명과학연구원

** 국립수의과학검역원

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

Fax: +82-2-873-2087

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

2010년 3월 30일 투고

2010년 4월 14일 심사완료

2010년 4월 22일 게재확정

일반적으로 동절기의 경우 차가운 외기로부터 가축을 보호하고 환기로 인한 열손실을 줄이기 위하여 최소 환기를 실시한다. 그러나 최소 환기의 경우, 먼지 및 암모니아가 쉽게 배출되지 못하고 시설 내부에 집적되어 그 농도가 적정 사육 환경 기준치 이상으로 높아지는 상황을 야기한다. 따라서 환기를 통한 내부 환경 개선에는 그 한계가 존재하므로 돈사 내 공기의 질적 개선을 위한 부가적인 장비의 적용 및 운영이 적절한 대안으로 부상하고 있다. 이에 따라 축사 내 발생하는 먼지 및 암모니아 등을 제거하여 정화된 깨끗한 공기를 가축에게 제공함으로써 생산성 향상 및 근로자의 작업 환경 개선을 도모하고자 습식 공기 정화기가 개발되어 사용되고 있다 (IPET, 2008).

따라서 시설 내 공기 유동이 최소화 되는 동절기의 환기 상태에서 최소한의 습식 공기 정화기를 이용하여 공기 정화 능력을 극대화하고 경제적인 운용을 위해서는 기존 축사의 환기 시스템에 대한 검토와 습식 공기정화기의 도입으로 인한 내부 기후의 변화 및 그 상호 작용, 그리고 습식 공기정화기의 효율적인 성능 발휘를 위한 적정 배치에 대한 연구가 동반되어야 한다. 그러나 연구자가 연구자 의도에 따라 시설 구조를 인위적으로 변경하며 다양한 실험을 수행하는 현장 실험의 경우 많은 비용과 시간, 노력 등이 요구되며 비가시적인 공기의 유동 특성을 파악하는 데는 많은 한계가 따른다. 이러한 현장 실험의 한계를 극복하기 위하여 최근 다양한 유체 유동 해석 연구에 널리 사용되고 있는 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 기술이 적용되고 있다. 전산유체역학 기술은 환기의 주 메커니즘인 공기 유동 현상을 연구자가 원하는 임의 환경 조건 하에 다양하고 정확하게 모의할 수 있으며 많은 양의 정성적, 정량적 데이터를 확보할 수 있다는 장점이 있으며 최근 농업 분야에서는 Harral et al. (1997), Bjerg et al. (2002), Lee et al. (2002), Sun et al. (2002), Lee et al. (2009), Seo et al. (2009, 2010)이 축사 시설 내 환기 작용 및 공기 유동을 예측하기 위해 전산 유체역학 기법을 이용하며, Seo et al. (2008, 2010)은 연구 대상 돈사 모델의 신뢰성 확보를 위한 현장 실험 수행 및 모델의 정확도를 검증한 바 있다.

본 연구에서는 전산유체역학 기법을 이용한 시뮬레이션 연구를 통하여 돈사의 내부 환경 및 환기 효과 개선을 위한 습식 공기정화기의 적정 위치를 제시하고자 하였다. 기존 돈사의 환기 구조 및 습식 공기정화기의 배치에 따른 온도 및 암모니아 농도의 내부 환경 분포를 비교·분석하고 이를 통하여 습식 공기정화기의 성능을 보다 효과적으로 발휘할 수 있는 적정 위치를 규명하고자 하였다. 전산유체역학 시뮬레이션을 통하여 구현한 대상 돈사 모델의 신뢰성 확보를 위한 현장 실험의 수행 및 모델의 정확도 검증은 서 등 (2008, 2010)에 의해 선행 연

구로 수행된 바 있다.

II. 연구 재료 및 방법

충청북도 충주시 살미면 문강리에 소재한 약 700두 규모의 육성 돈사를 대상으로 습식 공기정화기의 적정 배치 및 그에 따른 돈사 내부 환경 변화를 분석하기 위해 전산 유체역학 상용 툴인 GAMBIT (ver. 2.4, Fluent Co. New Hampshire, USA) 과 FLUENT (ver. 6.3, Fluent Co. New Hampshire, USA)를 사용하였다. 시뮬레이션 모델의 초기 입력 자료는 Seo et al. (2008)에 의해 수행된 선행 연구의 현장 실험 결과를 사용하였다.

1. 습식 공기정화기

습식 공기정화기는 돈사 내 발생하는 악취, 부유 먼지, 암모니아 등을 제거하고 정화된 공기를 가축에게 제공하여 생산성 향상을 도모하고 근로자의 작업 환경을 개선시키기 위하여 도입되었다. 본 연구에서 사용된 습식 공기정화기는 “중양 기술산업”사의 제품으로 초미세 물 필터를 이용한 집진방식을 채택하였으며 풍량은 3,000 CMH이며 그 제원은 Fig. 1과 같다. 돈사 내부의 오염된 공기는 습식 공기정화기의 상단부의 유입 팬을 통하여 기계 내부로 흡입되며 내부의 미세 물 필터를 이용하여 정화된 공기는 각각 45° 방향으로 배출되는 시스템으로 구성되어 있다.

Fig. 1 The schematic design of Wet Air Cleaner (Unit : mm).

2. 시뮬레이션 모델 설계

가. 시뮬레이션 틀

전산유체역학은 냉·난방 공조, 해양 조선 공학, 분자 확산 연구 등 다양한 분야에서 주목받고 있는 분야로서 최근에는 온실이나 축산 시설, 저장고 등 농업 시설의 환기 연구에 널리 활용되고 있다. 전산유체역학은 비선형 미분 방정식인 Navier-Stoke 방정식을 유한차분법 (FVM, Finite volume method)을 사용하여 이산화 과정을 거치고 변환된 대수 방정식을 수치 해석 기법의 알고리즘을 사용하여 유체의 유동 문제를 풀이하고 해석하는 기술이다. 최근에는 컴퓨터의 처리 속도 향상 및 네트워크 발달에 힘입어 병렬 처리가 가능해짐에 따라 많은 시간 및 고성능의 계산 처리 능력을 요구하는 다양하고 복잡한 분야에 많이 활용되고 있다.

본 연구에서는 실험 돈사의 구조를 설계하고 연산을 위한 유한개의 3차원 격자망 설계를 위하여 전처리 툴로서, 전산유체역학 상용 소프트웨어인 GAMBIT (ver. 2.4, Fluent Co. New Hampshire, USA)을 사용하였으며 대상 영역에 대한 유체 유동 해석을 위해 FLUENT (ver. 6.3, Fluent Co. New Hampshire, USA)를 사용하였다. GAMBIT은 2차원 혹은 3차원의 기본적인 외형 및 격자망을 설계하고 경계 조건 정의에 사용되는 GUI (Graphical User Interface) 기반의 프로그램이다. 해석하고자 하는 대상 돈사의 기본 골격을 3차원의 부피 형태로 설계하고 돈방과 덕트, 팬 등의 환기구와 같은 세부 구조를 설계한 후 유한개의 3차원 격자망을 구성하였다. 메인 모듈로 사용되는 FLUENT는 C언어를 기반으로 만들어졌으며, 동적인 메모리 할당, 효율적인 데이터 구조 체계 수립 및 유연한 계산 제어가 가능하게 만들어진 전산 유체역학 기반의 컴퓨터 모델링 및 분석 툴이다. FLUENT는 계산 영역 내 존재 하는 모든 격자들에 대하여 Reynolds-Averaged Navier-Stoke 방정식을 계산하며 유체 및 에너지의 이동 현상과 관련하여 질량, 운동량, 에너지 방정식을 미소 체적에 적용하여 비선형 연립 편미분 방정식에 대한 연산을 수행한다.

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

$$\text{Momentum} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

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

여기서 ρ 는 밀도 (kg m^{-3}), t 는 시간 (s), v 는 속도 (ms^{-1}), S_m 는 화학반응에 의해 생성되는 질량 소스 (kg m^{-2}), P 는 정압 ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$), τ 는 응력 텐서 ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$), $\vec{g}$ 는 중력 가속도 (ms^{-2}), $\vec{F}$ 는 외력 (kgms^{-2}), E 는 총 에너지 ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{kg}^{-1}$), k_{eff} 는 유효 전도율 ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-3} \text{K}^{-1}$), T 는 온도 (K), h_j 는 j 종의 현열 엔탈피 ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $\vec{J}_j$ 는 j 종의 확산 플럭스 ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), S_h 는 화학반응이나 복사에 의한 엔탈피 증가 ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-3}$)를 의미한다.

나. 시뮬레이션 모델 설계

시뮬레이션 모델의 기본 구조 및 격자 설계는 CFD 상용 프로그램인 GAMBIT을 사용하였다. Seo et al. (2008, 2010)의 선행 연구를 통하여 정확도가 검증된 돈사 모델 설계 기법을 적용하여 습식 공기정화기를 각 위치에 적용하였다. 실험 대상 돈사는 Fig. 2, 3과 같이 폭 14 m, 길이 73 m이며 돈방은 4 m × 4 m 크기로 각 18개씩 총 3열로 배치되었으며 돼지는 돈방 당 11~12마리씩 배치되었다. 대상 돈사의 환기는 남측 외벽과 지붕 사이 측창의 흡입부를 통하여 신선 외기가 유입되며 천장에 설치된 총 8개의 음압식 덕트를 통하여 배기되는 구조로 이루어진다. 대상 돈사의 기본 골격 및 환기 구조는 실제 대상 돈사의 제원을 Seo et al. (2008, 2010)의 연구에서 사용된 시뮬레이션 모델과 같은 방식으로 설계하였고 특히 온도, 암모니아 농도 등과 같은 환경 변화의 주 요인으로 꼽히는 내부 유동장에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상되는 덕트, 돈방, 습식 공기 정화기 등은 각각의 기본적인 특성을 유지할 수 있는 범위 내에서 단순화시켜 적용하였다. 기존의 축산 시설의 내부 환경 분석에 CFD를 이용한 대부분의 연구에서는

Fig. 2 The schematic design of a pig house and its ventilation configuration (Unit : mm) (Seo et al., 2008).

Fig. 3 The schematic design of a pig house (Unit : mm).

돼지를 고려하지 않거나 바닥에 돼지의 온도만을 부여하는 등 다소 현실성이 떨어지는 한계를 보였다. 본 연구에서는 돼지 주변의 미기상학적 기류의 영향을 고려하고 돼지의 열발생량을 고려하는 등 보다 현실적인 시뮬레이션 설계를 위하여 Seo et al. (2010)의 논문에서 시뮬레이션의 수렴성 및 합리적인 격자 설계를 고려하여 설계한 돼지 모델을 사용하였다.

난류모델은 유동 해석 및 수치 해석에 있어서 해의 수렴성에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로서 본 연구에서는 Lee et al. (2005)에 의해 수행된 농업 시설을 대상으로 한 풍동 실험과 PIV (Particle image velocimeter) 실험 결과 및 전산 유체역학 시뮬레이션 결과의 비교 분석을 통하여 그 결과 가장 높은 신뢰도를 보인다고 판단한 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. RNG $k-\epsilon$ 난류 모델은 Renormalization group theory로 일컬어지는 통계 기술을 이용하여 Navier-Stoke 방정식으로부터 유도된 모델로서 기존의 Standard $k-\epsilon$ 난류 모델과 유사하나 k 와 ϵ 값을 보정하여 거칠고 빠른 유동 및 와류 유동 해석에 있어서 더 높은 정확도를 보유하고 있다. 본 난류 모델에 대한 구체적인 수송 방정식은 다음과 같다. (Fluent manual, 2009)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) \quad (5)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_\epsilon u_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_{3\epsilon} G_b)$$

$$- G_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon$$

여기서, k 는 난류 동적 에너지, ϵ 는 k 에 대한 소산율, G_k 는 평균 속도 구배에 의한 난류 동적 에너지의 생성, G_b 는 부력에 의한 난류 동적 에너지의 생성, Y_M 은 전체 확산과정에서 압축성 난류의 변동하는 팽창 정도를 의미하며 α_k , α_ϵ 는 각각 k 와 ϵ 의 inverse effective Prandtl 수, S_k 와 S_ϵ 는 UDF에 의한 소스 항, R_ϵ 는 RNG- ϵ 방정식으로부터 얻은 결과 값, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ 는 상수이다.

3. 시뮬레이션 연산 방법

초기 조건으로 사용되는 돈사 벽체의 온도, 돼지 체온, 돈방

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

Contents		Values
Temperature	North and West wall	13.7 °C
	South and East wall	16.5 °C
	Aisle floor	13.0 °C
	Partition at pig room	16.0 °C
	Floor at pig room	20.6 °C
	Surface of pig	40.0 °C
	Roof	18.3 °C
	Outside air	6.2 °C
Humidity	Floor at pig room	0.013572 kg·m ⁻³
	Outside air	0.004353 kg·m ⁻³
Concentration of Ammonia gas	Floor at pig room	40 ppm
		100 % ㄱ
Ventilation rates (air exchange)		0.0918AER

근처에서 발생하는 암모니아 및 수분 등은 Seo et al. (2008, 2010)에 의해 수행된 현장 실험 결과 값을 사용하였다 (Table 1). 돼지의 몸에서는 체온, 암모니아 가스 및 수분만이 발생하는 것으로 가정하였다. 습식 공기정화기로 들어간 공기는 정화되어 배출 시 암모니아는 완전히 제거되는 것으로 가정하였고 온도의 경우 잠열을 고려하여 약 2 °C 감소되도록 설계하였다. 습식 공기정화기의 작동 과정을 C언어를 이용하여 FLUENT의 UDF (User define function) 기능을 연결하여 구현하였다. 습식 공기 정화기는 Fig. 1의 상부 팬을 통하여 돈사 내 오염된 내부 공기가 유입되고 동일한 유량의 공기가 습식 공기 정화기에 대하여 각각 45° 방향으로 두 방향으로 분출되도록 설계하였다. 실험 대상 돈사의 환기량은 현장 실험 시 다채널 열선 풍속계를 사용하여 측정한 덕트 등의 입·배기구 유속 결과에 근거하여 약 10.9 분에 내부 공기가 한번 교체 되는 것으로 가정하였다. 또한 현장 실험 결과를 바탕으로 돈사 바닥에는 약 40 ppm의 암모니아 가스 및 100 %의 상대습도를 지니는 수분이 존재하는 것으로 가정하였다.

습식 공기정화기의 효과적인 사용을 위하여 전산유체역학 시뮬레이션을 통하여 그 적정 배치 및 방향을 결정하기 위하여 습식 공기정화기가 설치되지 않았을 경우를 포함하여 총 6가지 경우를 선정하여 이들의 결과를 비교 분석하였다. 각 구조는 습식 공기정화기의 성능을 극대화할 수 있도록 시설 내부의 유동 기류를 예상하여 공학적 관점에 따라 선정하였으며 각 경우에 따라 습식 공기정화기의 위치 및 방향에 따른 온도, 암모니아 가스 농도 등의 내부 환경 요인 변화를 비교, 분석하고 이를 바탕으로 습식 공기정화기의 성능이 효과적으로 발휘되는 적정 배치를 결정하고자 하였다. 시뮬레이션 수행을 위해 선정

된 습식 공기정화기의 배치 및 방향은 다음 Fig. 4와 같다. 구조 1은 습식 공기정화기가 설치되지 않은 기존 돈사의 경우이며 구조 2는 동쪽 측벽의 한 방향으로 내부 기류를 유도하고, 구조 3은 각각 양 측벽을 향해 구조 4는 구조 내부 중앙부를 향하여, 그리고 구조 5와 구조 6은 각각 북측 및 남측 측벽으로 내부 기류를 유도하고자 하는 경우이다.

Fig. 4 The location and direction of the wet air cleaner for analysis and comparison of the effect to remove noxious gas.

Fig. 5 The data point for analysis of uniformity and stability of ammonia gas.

또한 습식 공기정화기의 배치에 따른 암모니아 가스 농도의 균일성 및 안정성을 분석하기 위해 다음 Fig. 5와 같이 폭 방향, 길이 방향으로 총 15개의 측정 지점을 선정하여 이에 대한 분석을 실시하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 시뮬레이션 모델 설계

Seo et al. (2008, 2010)의 선행 연구를 통하여 정확도가 검증된 대상 돈사의 시뮬레이션 모델을 기반으로 각 구조에 따라 습식 공기정화기를 배치하고 격자를 구성하였으며 돈사 내부 유동 해석과 관련한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 제작된 시뮬레이션 모델의 격자 구성 및 격자 개수는 Table 2와 같으며 시뮬레이션 모델의 형태는 Fig. 6과 같다. 돈방 내부에는 Seo et al. (2008, 2010)에 의해 고안된 돼지 모델을 랜덤하게 배치하였으며 습식 공기정화기의 배치에 따른 그 효과에 대한 비교·분석을 위해 기계가 배치되는 지역을 작업의 편의를 위해 각각 ‘interior zone’으로 설정하여 필요에 따라 각각 습식 공기정화기를 사용/미사용 하도록 설계하였다.

Table 2 The desinged computation domain using GAMBIT

Size of the simulation domain	14 m width × 73 m length × 5.2 m height
Shape of meshed	Hexahedron-map Hexahedron-wedge/cooper Tetrahedron-hybrid/tgrid
Number of meshed	2.32 million meshes

Fig. 6 The schematic design of the whole pig house of the CFD simulation model.

Fig. 7 Example of the arrangement of pigs in CFD simulation model.

2. 습식 공기정화기 배치에 따른 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 현장 실험 결과를 고려하여 10.9분당 내부 공기가 한번 교체되는 것으로 가정하였으며 환기가 진행된 후 온도 분포 및 암모니아 농도 분포에 대하여 각각 돼지 높이 (0.35 m height), 습식 공기정화기의 배출구 중심선 높이 (1.9 m height)를 중심으로 분석하였다.

가. 습식 공기정화기가 존재하지 않는 기존의 돈사 구조

환기가 진행된 후 내부 온도는 길이 방향으로 일정한 분포를 보였으며 폭 방향으로 온도 구배가 형성되었다. 이는 대상 돈사의 환기 구조가 남측 측벽의 처마 아래 입기구를 통하여 신선한 외기가 유입되고 북측의 반대쪽 덕트를 지나 지붕방향으로 배기되면서 폭 방향의 온도 구배가 나타나기 때문인 것으로 판단되었다. 기존 돈사의 본래 환기 설계 의도는 지붕 방향으로 외부 공기가 유입된 후 돈사 내부 상층부에 존재하는 따뜻한 공기와 혼합되어 온도가 상승된 후 돈방으로 하강하여 찬 공기로 인한 가축의 피해를 미연에 방지하고자 하였다. 그러나 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 Seo et al. (2008, 2010)은 선행 연구를 통하여 입기구를 통해 유입되는 신선 외기가 돈사 상층 중앙부까지 뺏어나가지 못하고 지붕 아래 형성되는 와류로 인하여 유입되는 공기를 지속적으로 유입구 인근 측벽 쪽

으로 밀어내는 유동 형태를 보인다고 지적하였다. 따라서 차가운 외기가 유입구 인근 측벽 아래 돈군으로 떨어지는 현상을 보였고 돈사 내부 온도 편차를 증가시켜 균일성 및 안정성을 저해시키는 요인으로 판단되었다. 돈군의 평균 온도는 19.1 °C로서 일반적인 비육돈 적정 환경 기준인 15~20 °C에 부합되는 것으로 나타났으나 돈군 높이에서 평균 14.6 °C의 편차를 보이며 온도의 균일성에 문제가 나타났다.

암모니아의 농도는 온도 분포와 비슷한 경향을 보이는데 이는 가스의 이동 및 온도 구배가 공기 이동에 지배되기 때문이다. 돈군 높이 (0.3 m)에서 암모니아 가스 농도의 경우 공기 이동 방향에 따라 처마 아래 입기구 인근 일수록 그 농도가 낮고 덕트 인근 일수록 높은 분포를 보였다. 양 출입구 주변, 돈방의 구조상 각 열마다 설치된 칸막이 인근으로 높은 농도 분포를 보였으며 이는 벽 근처에서 공기 유동의 크기가 상대적으로 작게 나타나게 됨에 따라 공기가 정체되는 지역이 발생하기 때문이다. 돈군 높이에서의 암모니아 평균 농도는 21.8 ppm 정도로 NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health)가 제시한 돼지 생산성에 영향을 미치지 않는 기준이 되는 11 ppm에 대해 약 2배 정도 높은 수치로서 유해가스에 대한 안정성에 다소 문제가 있을 것으로 사료되었다. 균일성 및 안정성 차이를 파악하기 위해 각 측정 지점 (Fig. 5) 별 암모니아 가스 농도를 살펴보면 총 15개의 측정 지점에서 암모니아 평균 농도는 약 19 ppm으로서 전체 평균 농도에 비해 다소 낮은 값을 보였다. 이는 공기 유동이 다소 적은 측벽 근처의 값이 제외되었기 때문으로 판단되었다. 신선 외기가 유입되는 인근 지역인 3열의 암모니아 평균 농도가 상대적으로 낮게 나타났으며 2열은 3열에 비해 2 %, 1열은 15 % 높은 농도 분포를 보이는 등 폭 방향으로 배기구에 근접할수록 높은 농도 분포를 보였다. 돈사 전체에 대한 농도는 시뮬레이션 초기 배경 농도에 비하여 약 24.7 % 감소한 것으로 나타났다.

(a) original purpose of ventilation design

(b) actual ventilation situation

Fig. 8 Performance of ventilation of pig house in the winter time.

나. 습식 공기정화기의 배치에 따른 내부 환경 변화 분석

습식 공기정화기로부터 정화된 공기가 직접적으로 영향을 미치는 근접 지역에서 상대적으로 낮은 온도 및 가스 농도 분포를 보였다. 특히 기계 높이 (0.9 m)에서 낮은 수치를 보이고 있었으나 Table 3과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 대부분의 경우, 돈군 높이에서의 평균 온도는 일반적인 비육돈 적정 환경 기준에 부합하는 것으로 나타났다. 또한 일부 구조에서 공기정화기가 설치되지 않은 구조에 비해 약간의 온도 상승 효과를 보이는 것은 정화되어 배출되는 공기가 습식 공기정화기 높이에 존재하던 상대적으로 더운 공기를 밀어냄으로서 국지적인 유동을 생성하였고 이는 일부지역의 온도 상승을 야기 시켰기 때문인 것으로 판단되었다.

Table 3 The results of average temperature at pig height (0.3 m)

Configuration	Average temperature at pig height (0.3 m), °C
case 1 (non installation)	19.1
case 2	19.7
case 3	18.8
case 4	19.2
case 5	19.2
case 6	19.2

Fig. 9 The distribution of air temperature at pig height (0.3 m) in each case.

암모니아 농도의 경우, 구조 2는 습식 공기정화기의 영향을

길이 방향으로 직접 받게 되는 폭-2 영역에서 폭-3, 폭-4 영역에 비해 약 12.2 % 낮은 농도를 보이는 등 폭 방향으로 환기되는 돈사 내부 기류로 인하여 정화된 공기가 예상만큼 그 영향 범위가 크지 않음을 결과를 통해 확인할 수 있었다. 초기 농도 대비 36.2 %의 암모니아 가스가 제거된 것으로 나타났으며 길이 방향으로 비교 할 경우 3열 대비 2열에서 3 %, 1열에서 17 %의 높은 농도 차이를 보이는 등 구조 1에 비해 균일성이 떨어지는 결과를 보였다.

구조 3은 정화된 공기가 서로 반대 방향으로 배출되는 구조로서 양쪽 출입문을 향해 배출된 기류가 측벽에 도달한 후 다시 반대 방향으로 순환하는 기류 패턴을 보였으며 따라서 기계 사이 중앙부에서 상대적으로 높은 암모니아 농도 분포를 보였다. 또한 정화된 공기가 돈사 내부의 암모니아 가스를 각각 양 끝 벽으로 밀어 넣으로써 양 끝 벽 부근에서 상대적으로 높은 농도 분포를 보였으며 돈군 높이에서의 암모니아 농도의 경우 돈사 전체를 기준으로 구조 1에 비하여 무려 15.3 % 향상된 43.8 %의 암모니아 제거율을 보였다. 길이 방향을 기준으로 비교할 경우 1열에 비하여 2열은 2 %, 3열은 16 %의 농도 증가를 보이는 등 역시 배기구 근처 주위로 높은 농도를 보였으며 이는 구조 1과 비교할 때 균일성이 좋지 않은 것으로 나타났다.

끝 벽을 향해 정화된 공기가 배출되는 구조 3과는 달리 확산 거리가 확보된 구조 4의 경우 정화된 공기 영향 범위가 상대적으로 확대되었으나 중앙부의 경우 영향 범위 한계 및 정화된 공기가 암모니아 가스를 중앙부로 밀어내는 유동 특성 상, 상대적으로 높은 농도 분포를 보였다. 실제로 측정 지점별 결과를 비교할 경우 중앙부의 경우 평균 농도에 비해 약 16.3 % 높은 농도 값을 보였으며 폭 방향을 기준으로 비교할 경우 폭-1에 비해 폭-3에서 4.7 ppm의 차이를 보이는 등 균일성에 있어서 상대적으로 불량한 구조로 판단되었다. 돈사 전체의 암모니아 제거율은 구조 1에 비하여 약 7.0 % 증가한 35.5 %를 보였다.

구조 5의 경우 내부 기류 방향과 동일하게 정화된 공기가 배기됨에 따라 내부 기류의 영향으로 상대적으로 많은 영역에 영향이 미치는 것으로 판단할 수 있었다. 따라서 내부 기류에 수직한 방향으로 정화된 공기가 배출되는 구조와 달리 돈사 전체에 고르게 효과를 미치는 것으로 나타났으며 실제로 지점 별 결과를 비교하면 구조 1에 비하여 균일성이 35 % 향상된 것을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 타 구조와 마찬가지로 배기구 인근에서 상대적으로 높은 농도 추이를 보였으나 그 편차가 크지 않아 길이별 농도 분포 역시 타 구조에 비해 상대적으로 균일성이 우수하다는 결과를 얻을 수 있었다. 돈사 전체에 대한 암모니아 제거율은 약 39.4 % 정도로 나타났다.

(a) case 1

(b) case 2

(c) case 3

0 ppm 40 ppm

Fig. 10 The distribution of concentration of ammonia gas at pig height (0.3 m) and machine (1.9 m) in case 1, 2 and 3.

구조 6의 경우 배기구 쪽 돈방 옆에서 내부를 향해 정화된 공기를 배출시킴으로써 환기에 의한 효과와 습식 공기정화기로 인한 효과를 돈사 전체에 적절히 혼합하고자 설계한 구조이다. 암모니아 농도의 경우 환기를 통한 내부 기류 및 습식 공기 정화기로부터의 정화된 공기가 가운데 열에서 서로 혼합됨으로서 그 효과가 비교적 균일하게 돈사 전체에 영향을 미치는 경향을 보였다. 실제로 지점 별 결과를 분석한 결과 1열과 2열의 경우 타 구조에 비해 암모니아 제거율이 우수하였다. 그러나 3열의 경우 상대적으로 습식 공기 정화기의 효과를 제대로 받지 못하였으며 상대적으로 매우 높은 농도 분포를 보였다. 돈사 전체를 기준으로 구조 1에 비하여 29 % 향상된 균일성을 보였으나 길이 방향으로는 3열이 1, 2열에 비해 상대적으로 높은 암모니아 가스 농도를 보임으로써 실제 길이 방향의 균일성 문제가 제기되었다. 돈사 전체에 대한 암모니아 제거율은 구조 1 대비 약 6.3 % 우수한 결과를 보였다.

(a) case 4

(b) case 5

(c) case 6

0 ppm 40 ppm

Fig. 11 The distribution of concentration of ammonia gas at pig height (0.3 m) and machine (1.9 m) in case 4, 5 and 6.

다. 시뮬레이션 결과 종합

온도의 경우, 습식 공기정화기가 설치되지 않은 구조 1과 설치된 그 외 구조 모두 일반적인 비육돈의 적정 환경 기준에 부합되는 것으로 나타나는 등 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 습식 공기정화기로부터 배출되는 정화된 공기가 직접 도달하는 그 영향 범위가 돈사 규모에 비해 극히 작기 때문이었으며 또한 정화된 공기가 배출되는 방향이 내부 기류 방향과 수직하게 위치하거나 반대로 위치하는 등에서 그 원인을 찾을 수 있었다. Fig. 12는 돈사 전체 및 돈군 높이에서의 암모니아 평균 농도수치이며, Table 4는 각 구조 별 돈군 높이에 위치하는 총 15개의 측정에서의 암모니아 농도, 돈사 전체에 대한 암모니아 제거율 및 각 측정 별 암모니아 농도에 대한 표준 편차 및 그에 따른 균일성 수치 결과이다. 습식 공기정화기가 설치되지 않았던 구조 1의 경우 돈군 높이에서의 지점 별 결과에 따른 평균 농도는 19.1 ppm 이었으며 환기가 진행 된 후 돈사

전체에 대한 암모니아 제거율은 24.7 %로 15.1 ppm의 평균 농도를 보였다. 동쪽 측벽으로 정화된 공기를 유도하도록 습식 공기 정화기가 배치된 구조 2의 경우 돈군 높이에서의 평균 농도는 18.3 ppm, 돈사 전체에 대해서는 12.8 ppm으로 약 36.2 %의 암모니아 제거율을 보였다. 서쪽 및 동쪽 측벽으로 각각 정화된 공기를 배출하도록 설치된 구조 3의 경우는 돈군 높이의 경우 18.4 ppm, 돈사 전체에 대해서는 11.2 ppm으로 43.8 %의 암모니아 제거율을 보여 습식 공기정화기의 효과가 가장 큰 구조로 판명되었다. 구조 4의 경우 돈군 높이에서의 암모니아 농도는 18.4 ppm, 돈사 전체는 12.9 ppm이었으며 폭 방향으로 북쪽 측벽 및 남쪽 측벽으로 각각 정화된 공기를 배기하는 구조 5 및 구조 6은 돈군 높이의 경우 18.7 ppm, 18.5 ppm, 돈사 전체에 대해서는 39.4 %, 31.0 %의 암모니아 제거율을 보였다. 그러나 구조 5에서와 같이 기존 환기 구조로 인해 형성되는 내부 유동장과 같은 방향으로 정화된 공기를 배출하는 구조 5의 경우 균일성에서 구조 1에 비해 약 35.1 % 향상된

결과를 보여 39.4 % 정도의 암모니아 제거율을 고려할 때 돼지 사육에 있어서 타 구조에 비해 보다 적절한 구조로 추천될 수 있다.

Fig. 12 Concentration of ammonia gas at pig height (data from 15 designated points) and pig house.

Table 4 The results of concentration of ammonia gas at designated point at pig height (0.3m) in each case, PPM

		Concentration of Ammonia gas					Ave.	ERA	Std.	Uni.
		w-1	w-2	w-3	w-4	w-5				
case 1	l-1	22.2	22.7	21.9	20.5	17.9	19.1	24.7 %	2.4	
	l-2	18.3	19.5	20.3	18.0	14.6				
	l-3	18.5	19.9	18.5	17.9	14.5				
case 2	l-1	20.6	16.2	22.3	21.6	21.4	18.3	36.2 %	2.2	10.0 % ↑ Comparing with case 1
	l-2	17.4	16.1	17.7	18.5	17.6				
	l-3	17.2	15.1	17.3	18.4	17.2				
case 3	l-1	17.8	21.8	21.5	21.1	20.8	18.4	43.8 %	2.1	14.8 % ↑
	l-2	15.5	18.3	18.5	18.3	16.9				
	l-3	15.2	17.9	18.3	18.3	16.4				
case 4	l-1	16.6	21.5	22.3	20.6	18.3	18.4	35.5 %	2.4	2.3 % ↑
	l-2	17.0	18.6	20.3	18.5	14.9				
	l-3	15.3	18.0	20.0	18.2	15.1				
case 5	l-1	18.0	18.6	22.0	20.0	21.7	18.7	39.4 %	1.6	35.1 % ↑
	l-2	18.6	17.8	19.5	17.2	18.9				
	l-3	18.3	17.6	17.9	16.2	18.3				
case 6	l-1	20.3	19.7	21.5	21.1	20.8	18.5	31.0 %	1.7	29.0 % ↑
	l-2	17.6	17.6	18.1	18.1	17.5				
	l-3	16.6	17.0	22.0	16.9	17.1				

Note l-n : n th layer

w-n : n th width

Ave. : Average

Std. : Standard deviation

ERA. : Elimination rate of ammonia gas for total volume of pig house

Uni. : Uniformity

V. 결 론

동절기의 돈사의 환기는 환기로 인한 열손실을 줄이기 위해 최소 환기를 실시하기 때문에 유해 가스가 내부에 기준 농도 이상으로 축적되는 등 환기를 통한 내부의 적정 환경 유지는 미흡하다. 따라서 유해 가스 제거를 통하여 그에 따른 사육 환경 개선, 생산성 향상 및 근로자의 작업 환경 개선을 도모하기 위해 습식 공기정화기의 적용이 대두되었으며 기존의 환기 시스템의 검토 및 공기 정화기와와의 상호 작용, 공기 정화기의 효과를 향상시키기 위한 적정 배치에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 Seo et al. (2008, 2010)에 의해 현장 실험 결과를 바탕으로 검증된 돈사의 전산 유체역학 기법을 이용한 시뮬레이션 모델을 바탕으로 습식 공기정화기로 인한 내부 환경 개선 효과 분석 및 적정 배치에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

습식 공기정화기가 설치되지 않은 기본 구조의 경우 처마 밑 입기구로부터 덕트 배기구 방향으로 온도 및 암모니아 농도 구배가 나타났으며 돈사 내부 상부의 따뜻한 공기를 이용하려는 설계 의도와는 달리 차가운 외기가 입기구 아래 바로 측면으로 하강하여 온도 및 암모니아 가스 농도에 대한 균일성 문제가 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 기존 환기 구조로 인하여 형성되는 내부 유동장과 같은 방향으로 습식 공기정화기의 배출구 방향을 설정할 경우 타 구조에 비해 내부 기류의 영향을 받아 상대적으로 광범위한 영역에 암모니아가 제거된 신선한 공기를 공급할 수 있었으며 그 효과가 돈사 내부에 고르게 영향을 미치는 것을 판단할 수 있었다. 실제로 습식 공기 정화기가 설치되지 않은 구조 1에 비해 9.9 % 향상된 39.4 %의 암모니아 제거 효율을 보였으며 균일성은 35 % 향상되었으며 기존의 길이 방향으로 나타났던 암모니아 가스 농도 구배 역시 타 구조에 비해 상대적으로 보다 더 균일해 지는 것으로 나타났다.

돈사 내부의 암모니아 가스의 절대량 감소를 목표로 할 경우에 가장 효과적인 구조는 구조 3으로 양쪽 출입문을 향해 정화된 공기를 배출함으로써 암모니아 가스를 양 끝 벽으로 밀어내는 형태의 유동을 보였으며 구조 1에 비해 약 15.3 % 향상된 43.8 %의 암모니아 제거율을 보여 타 구조들 보다 약 2 배 가량의 성능을 발휘하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 돈사의 환기 구조를 통제 변인으로 하여 습식 공기정화기의 최적 배치에 대하여 연구를 진행하였으나 향후 연구를 통해 환기 구조 역시 조작 변인으로 하여 환기구조에 기인한 내부 기류, 습식 공기정화기의 배치 및 그로부터 배출되는 정화된 공기의 복합적인 내부 효과 분석을 통하여 돈사 환기 구조 및 습식 공기정화기의 적정 설계에 대한 논의가 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. Bang, S. H., Jang, D. I., Jang, H. H., Lim, Y. I., 1998. Development of a measurement system for ammonia gas in swine housing. *Journal of Korean Society for Agricultural Machinery* 23(4): 359-364 (In Korean).
2. Bjerg, B., K. Svidt., G. Zhang, 2002. Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses. *Computers and Electronics in Agriculture* 34: 223-235
3. Farbman, A. I., 1992. Cell Biology of Olfaction. Cambridge University. Press, Cambridge, UK.
4. Harral, B. B., C. R. Boon., 1997. Comparison of predicted and measured air flow patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals. *Journal of Agricultural Engineering Researches*. 66: 221-228.
5. Jones, J. B., Carmichael, N. L., Watches, C. M., White, R. P., Jones, R. B., 2000. The effects of acute simultaneous exposure to ammonia on the detection of buried odourized food by pigs. *Applied Animal Behavior Science* 65(4): 305-319.
6. KMTA, Korea Meat Trade Association, <http://www.kmta.or.kr/>
7. Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, 2008. Ventilation study of pig house for effective application of a developed wet air cleaner (In Korean)
8. Lee, I. B., 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
9. Lee, I. B., Lee, S., Kim, G., Sung, J., Sung, S., Yoon, Y., 2005. PIV verification of greenhouse ventilation air flows to evaluate CFD accuracy
10. Lee, I. B., Sase, S., Han, H. T., Hong, H. K., Sung, S. H., Hwang, H. S., Hong, S. W., Seo, I. H., Kwon S. H., 2009, Ventilation design for a chick incubator using computational fluid dynamics. *Japan Agricultural Research Quarterly* 43(3): 227-237.
11. Lee, S. H., Cho, H. G., Choi, K. J., Oh, K. Y., Yu, B. K., Lee, I. B., Kim, K. W., 2005. Measurement of ammonia emission rate and environmental parameters

- from growing-finishing and farrowing house during hot season. *Journal of Livestock House and Environment* 11(1): 1-10 (In Korean).
12. Seo, I. H., Lee, I. B., Hong, S. W., Hwang, H. S., Jessie P. B., Yoo, J. I., Kwon, K. S., Ha, T. H., Kim, H. T., 2008. Development of a cfd model to study ventilation efficiency of mechanically ventilated pig house. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(1): 25-37 (in Korean).
 13. Seo, I. H., Lee, I. B., Moon, O. K., Kim, H. T., Hwang, H. S., Hong, S. W., J. P. Bitog, Yoo, J. I., Kwon, K. S., Kim, Y. H., Han, J. W., 2009, Improvement of the ventilation system of a naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulations, *Biosystems Engineering* 104: 106-117.
 14. Seo, I. H., Lee, I. B., Moon, O. K., Hwang, H. S., Hong, S. W., J. P. Bitog, Kwon, K. S., Z. Yec, 2010. CFD simulation model for analysis of ventilation system in a full-scale pig house including multiple animals. *Biosystems Engineering*. (In Review)
 15. 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: 1559-1568.