



## 돈사 내부 열환경 분포의 공기연령 이론법 적용을 통한 전산유체역학 환기 예측 모델 개발

### Development of CFD model for Predicting Ventilation Rate based on Age of Air Theory using Thermal Distribution Data in Pig House

김락우\* · 이인복\*<sup>†</sup> · 하태환\* · 여옥현\* · 이상연\* · 이민형\* · 박관용\* · 김준규\*

Kim, Rack-woo · Lee, In-bok · Ha, Tae-hwan · Yeo, Uk-hyeon · Lee, Sang-yeon · Lee, Min-hyung · Park, Gwan-yong · Kim, Jun-gyu

#### Abstract

The tracer gas method has an advantage that can estimate total and local ventilation rate by tracing air flow. However, the field measurement using tracer gas has disadvantages such as danger, inefficiency, and high cost. Therefore, the aim of this study was to evaluate ventilation rate in pig house by using the thermal distribution data rather than tracer gas. Especially, LMA (Local Mean Age), which is an index based on the age of air theory, was used to evaluate the ventilation rate in pig house. Firstly, the field experiment was conducted to measure micro-climate inside pig house, such as the air temperature, CO<sub>2</sub> concentration and wind velocity. And then, LMA was calculated based on the decay of CO<sub>2</sub> concentration and air temperature, respectively. This study compared between LMA determined by CO<sub>2</sub> concentration and air temperature; the average error and root mean square error were 3.76 s and 5.34 s. From these results, it was determined that thermal distribution data could be used for estimation of LMA. Finally, CFD (Computational fluid dynamic) model was validated using LMA and wind velocity. The mesh size was designed to be 0.1 m based on the grid independence test, and the Standard k- $\omega$  model was eventually chosen as the proper turbulence model. The developed CFD model was highly appropriate for evaluating the ventilation rate in pig house.

**Keywords:** Age of air, Computational fluid dynamics, Local mean age, Pig house, Thermal distribution

#### 1. 서론

축산업은 농업분야에서 중요한 산업으로 자리매김하고 있으며, 2015년 기준 농림업 생산액의 약 43%를 차지하고 있다(MAFRA, 2016). 전체 축산업 중 축산물을 제외한 가축 사육 생산액 중에서 돼지 사육이 47.9%로 가장 높은 비중을 차지하고 있다(MAFRA, 2016). 국내 축산업은 지속적으로 성장하고 있으며 축산시설의 대형화, 현대화 등 다양한 형태로 발전하고 있다. 이에 따라, 대형 양돈시설 내부의 생육환경 조절을 통한 생산효율 극대화의 필요성이 대두되고 있다.

일반적으로 양돈시설은 다른 축종의 시설과 비교하여 오염 물질이 많이 집적되며 돈사가 대형화됨에 따라 축사 내부 환경의 균일성 및 안정성 문제가 발생하고 있다(Kwon et al.,

2011). 특히 우리나라는 여름철과 겨울철에 극심한 고온 및 저온현상이 발생하기 때문에 돈사의 적정 사육환경을 조성하기가 더욱 어려워지고 있다(Yoo, 1997). 이러한 열악한 생육 환경으로 인하여 가축의 성장은 저하되고 질병 발생율은 증가하여 생산효율이 떨어지게 된다. 이에 따라 가축이 원활하게 발육할 수 있도록 축산시설 내부의 생육환경을 적절하게 조절할 필요가 있다(Song et al., 2012). 가축의 최적생육환경을 조성하기 위한 주요 환경인자로서 온도, 습도, 가스 등이 있으며, 돈사 내부의 공기질은 일반적으로 환기를 통하여 관리되고 있다. 따라서 돈사의 주요 환경 인자의 종합적 조절인자로서 환기의 중요성은 부각되고 있으며, 적정 환기시스템 설계를 하여 돈사 구조, 형태 등에 따른 환기량을 정확히 예측할 필요가 있다.

환기 효율성을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로 크게 유출입 평가방법과 유동 추적방법이 있다. 유출입 평가 방법은 유입구와 출입구에서의 압력, 수분, 이산화탄소 등의 물리량을 측정하여 간단한 수치 모델이나 현장실험을 통하여 산정할 수 있다. 그러나 유출입 평가 방법은 시설 전체의 환기량만을 고려하기 때문에 국부적인 환기량을 예측할 수 없다. 이에 반하여 유동 추적법은 유동을 추적하여 시설 전체 환기량

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

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4586 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: [iblee@snu.ac.kr](mailto:iblee@snu.ac.kr)

Received: September 20, 2017

Revised: September 26, 2017

Accepted: October 10, 2017

과 지역적 환기량을 산정할 수 있다는 장점이 있다. 현재 유동 추적법을 통하여 환기량을 산정하는 연구는 다양하게 수행되었으며, Sandberg (1981)가 제안한 평균 연령과 실내체류시간의 개념이 널리 이용되고 있다. 특히 Liang (1994)은 환기 효율을 정의하기 위하여 대상 공간 내 농도곡선의 아래 면적이 아닌 농도의 감쇠율을 이용한 바 있다. 또한 Han et al. (2009)은 실내의 입기구로부터 도달시간과 실내공간의 국소 평균공기연령 (Local Mean Age; LMA)과의 관계를 수식화하고 이들 간의 관계를 수치해석으로 검증을 수행하였다. 특히 유동 추적 방법은 일반적으로 추적가스 방법 (Tracer gas method)을 통하여 유동을 추적하며 다양한 환경 조건에 대해서 환기량을 산정한 연구가 진행된 바 있다 (Morris and Neale, 1954; Lawrence and Whittle, 1960; Okada and Takakura, 1973; Bot, 1983; Nederhoff et al., 1985; De Jong, 1990; Sherman, 1990; Baptista et al., 1999). 그러나 추적가스를 이용한 환기량 산정방법은 현장실험 시 유해 가스의 위험부담이 있고 고가의 장비를 사용하기 때문에 효율성이 떨어진다. 또한 국내에서 대표적으로 사용되고 있는 추적가스인 CO<sub>2</sub>는 공기보다 무겁기 때문에 실제 공기흐름을 추적하는데 비효율적이라는 단점이 있다. 이에 따라 기존 추적가스를 사용하는 방법을 보완하여 환기량을 평가할 수 있는 방법이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 유동 추적법의 공기연령 (Age of air) 이론법을 바탕으로 열환경을 분석하여 돈사 내의 환기량을 산정하고, 이를 바탕으로 돈사의 환기량을 예측할 수 있는 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics; CFD) 모델을 개발하고자 한다. 특히 본 연구에서는 공기연령 이론법의 환기량 지표 중 하나인 LMA를 이용하여 열환경 분포의 적용성을 평가하고자 하였다. 먼저 자돈사 내에서 현장실험을 통하여 외부 기상 및 내부 환경 조건, 온도 (열환경 분포), 유속 분포, CO<sub>2</sub> (추적가스) 농도를 측정하였다. 측정된 결과를 바탕

으로 추적가스를 통한 LMA와 열환경 분포를 통한 LMA를 비교 분석하였으며, 열환경 분포를 통한 공기연령 이론법의 적용성을 평가하였다. 이후 전산유체역학 모델을 설계하고 열환경 분포를 통하여 도출한 LMA 결과를 바탕으로 난류 모델, 격자독립성 시험에 따른 검증을 실시하였다. 현장실험으로부터 측정된 LMA와 유동 결과를 이용하여 돈사 내의 환기량을 예측할 수 있는 최종 CFD 모델을 설계하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험 대상 시설

실험 대상 돈사는 경기도 여주군 가남면에 위치한 강제환기식 자돈사이며, 자돈방 내의 단열은 충분히 이뤄지고 있다. 실험은 2016년 5월~7월 동안 진행되었으며, 현장실험을 위하여 빈 돈방을 선택하여 실험을 진행하였다. 돈방의 크기는 폭 6 m, 길이 12 m, 높이 2.7 m 이다. 분뇨 처리 방식은 슬러리식으로 돈방 바닥은 전면 플라스틱 피트이며 바닥 밑으로 슬러리 피트가 설치되어 있다. 환기 방식은 직경 0.52 m 굴뚝 팬과 직경 0.52 m 측벽 팬을 이용한 강제 환기 방식이며, 외부 공기는 천공이 된 중천장과 입기 슬롯을 통하여 내부로 유입된다. 돈방 내부에는 철제 펜스를 설치하여 2 구역으로 구분하였으며 높이 1.1 m의 사료 급이기 8 대가 설치되어 있다 (Fig. 1).

### 2. 현장실험을 통한 공기연령 측정

#### 가. 추적가스법을 통한 LMA 산정

공기연령이란 실내로 유입된 공기가 임의의 지점까지 도달하는 시공간에 대해 평균한 값을 의미하는 개념으로 시간 단위를 갖는다. 일반적으로 외부로부터 유입된 공기는 임의의 지점까지 다양한 경로를 통하여 도달하게 되는데, 이 때 각

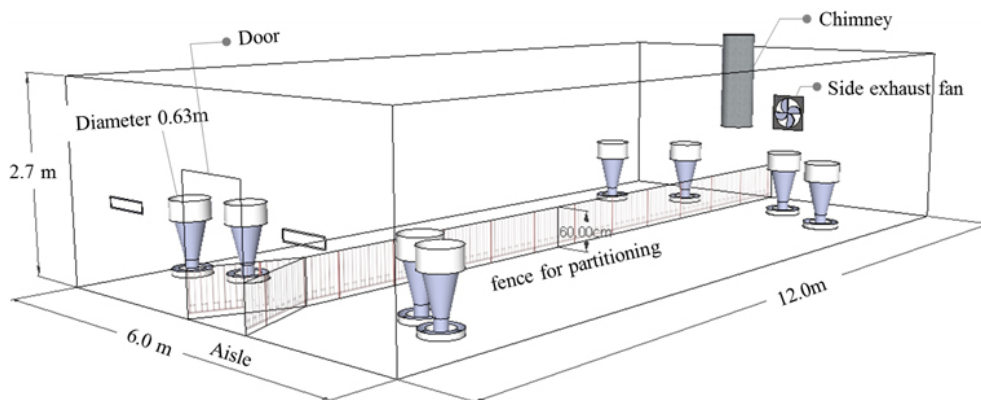


Fig. 1 Schematic view of target pig house

경로를 통하여 임의의 지점까지 도달한 시간의 평균값을 국소 평균공기연령이라 한다 (Sandberg and Sjoberg, 1983). 기존 유출입 평가 방법에 의한 환기량 산정 방식은 시설 전체의 환기량을 대표값으로 산정하기 때문에 내부의 국부적인 환기량의 차이를 정확히 평가하는데 한계가 있다(Kwon et al., 2011; Hong et al., 2008). 공기연령은 환기량 산정에 있어서 시간 개념을 도입하였기 때문에 환기를 효율적 측면에서 평가할 수 있을 뿐만 아니라 공기가 이동하는 평균 경로를 고려하기 때문에 기존의 환기 효율을 평가하는 방법들과 달리 공기의 흐름과 실제적인 유동을 반영할 수 있다는 강점을 갖는다.

추적가스법에 이용되는 가스는 CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 등의 가스들이며, 실험 대상 공간 내부에 균일하게 채워 넣은 후 환기를 실시하여 실시간으로 농도의 변화를 측정함으로써 환기 효과를 분석할 수 있다(Seo et al., 2008). 본 연구에서는 실험적으로 구현하기 쉽다고 알려진 체강법을 통하여 LMA를 산정하였다. 체강법에 따른 농도 변화 그래프는 Fig. 2 (a)와 같으며, LMA를 산정하는 식은 아래와 같다.

$$LMA_p = \int_0^{\infty} \left( \frac{C_p(t) - C_{\infty}}{C_0 - C_{\infty}} \right) dt \quad (1)$$

여기서,  $LMA_p$ 는 실내 임의의 지점인  $p$  지점에서의 국소 평균공기연령 (s),  $C_0$ 는 초기 농도 (ppm),  $C_p(t)$ 는  $t$  시간 후 임의의  $p$  지점에서의 농도 (ppm),  $C_{\infty}$ 는 임의의  $p$  지점에서의 수렴농도 (ppm),  $t$ 는 시간 (s) 이다.

#### 나. 열환경 분포를 통한 LMA 산정

유체 내부에 물질이 단순히 유체의 운동을 따라 움직이고 유체 운동이 물질의 존재에 대한 영향을 받지 않는다면 물질의 농도는 수동적인 스칼라 (Passive scalar)로 표현할 수 있다. 수동적인 스칼라인 물질의 순간농도의 시간에 대한 변화량은 유체 운동에 의한 대류와 분자확산에 의하여 결정된다.

이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \tilde{c}}{\partial t} + \tilde{u} \cdot \nabla \tilde{c} = x \nabla^2 \tilde{c} \quad (2)$$

여기서,  $\tilde{c}$ 는 물질의 순간농도,  $t$ 는 시간 (s),  $\tilde{u}$ 는 유체 속도 (m/s),  $x$ 는 분자확산계수 (m<sup>2</sup>/s)이다.

온도의 변화량도 농도의 변화량과 마찬가지로 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 단열재로 피복된 돈사의 경우 전도와 복사로부터 발생하는 온도 변화를 무시할 수 있으며, 열 수송은 대류에 의하여 발생하게 된다. 따라서 농도와 온도의 물리적 대류 확산 방정식이 동일하기 때문에 대상 돈사에서의 농도 및 온도 변화량은 유사한 값을 나타낸다. 이로 인하여 대상 돈사의 내부 열환경 분포를 이용하여 공기연령을 산정할 수 있다. 온도에 의하여 LMA를 산정하는 식은 아래와 같으며, LMA를 산정하기 위한 온도 변화 그래프는 Fig. 2 (b)와 같다.

$$LMA_p = \int_0^{\infty} \left( \frac{T_p(t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right) dt \quad (3)$$

여기서,  $LMA_p$ 는 실내 임의의 지점인  $p$  지점에서의 국소 평균공기연령 (s),  $T_0$ 는 초기 온도 (°C),  $T_p(t)$ 는  $t$  시간 후 임의의  $p$  지점에서의 온도 (°C),  $T_{\infty}$ 는 임의의  $p$  지점에서의 수렴온도 (°C),  $t$ 는 시간 (s) 이다.

#### 다. 추적가스와 열환경 분포를 통한 LMA 현장측정

현장실험에서 강제 환기를 실시할 때 열환경 감쇠를 통한 LMA 산정을 위하여 돈방 내에 온도 변화를 측정할 수 있는 열전대 (T-type)를 실험 돈방 내에 설치하였다. 또한 내부 공기 유동을 관찰하기 위하여 다측점이 가능한 열선 유속계 (Kanomax Inc, Japan)를 같은 방법으로 설치하였다. 한편 열환경을 이용한 LMA 산정 방법의 적용성을 평가하기 위하여

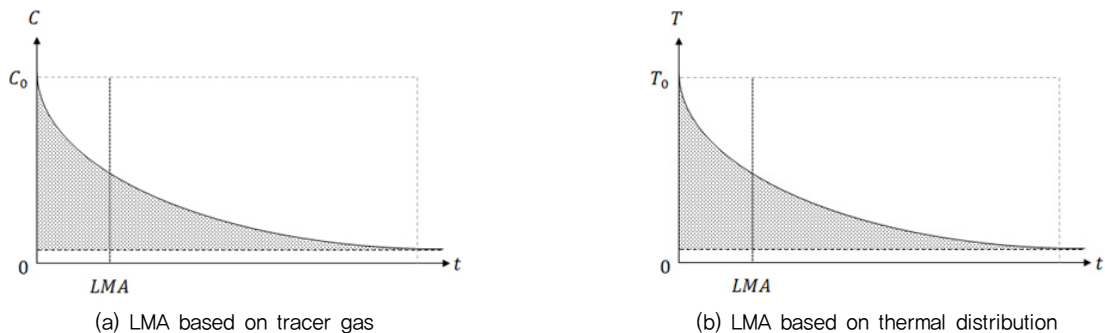


Fig. 2 Determination of LMA according to tracer gas and thermal distribution

기존의 추적가스를 이용한 LMA 산정을 하였으며, 이를 위하여 가스 측정 장비인 MultiRAE IR (RAE systems, USA)을 돈방 내부에 설치하여 추적가스 농도를 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 3과 같이 총 24개 지점으로 높이 방향은 A와 B로 2개, 수평 방향은 1~12까지 12 개로 구하였다. 열전대는 모든 지점에 설치하였고, 열선 유속계는 폭방향으로 중앙부 지점을 제외한 총 16개 지점에 설치하였으며, MultiRAE IR는 중앙부 지점과 1.2 m 높이를 제외한 총 8개 지점에 설치하였다. 또한 측벽과 굴뚝에 설치된 팬의 유량을 측정하기 위하여 휴대용 풍속계 (Testo SE & CO, Germany) 장비를 이용하여 유속을 측정하였다.

본 연구에서는 유속 및 온도 변화를 원활하게 측정하기 위하여 돈방 내부에 고풍속을 유지하고자 하였다. 또한 돈방 내부에 중천창과 바닥 피트층에 단열성이 높은 비닐을 설치하였다. 열환경 감시를 통한 LMA를 측정하기 위하여 입기 슬롯을 차단하여 내부를 완전 밀폐시킨 후에 열풍기 3대를 이용하여 내부 온도를 고르게 상승시켰다. 돈방 내 온도가 균일하

게 분포되어 있을 때 입기 슬롯을 개방하고 굴뚝팬과 측벽팬을 가동하여 실험을 진행하였다. 실험은 환기 시작 후 돈방 내부의 온도가 감소하여 다시 균일해지는 시점까지 실험을 진행하여 1초마다 데이터를 기록하였다. 마찬가지로 추적가스를 통한 LMA를 산정하기 위하여 동일한 실험조건에서 CO<sub>2</sub>를 돈방 내부에 공급하여 일정 농도가 고르게 분포하도록 농도 환경을 조성하였다. 동일한 환기량 제어 방식을 통하여 CO<sub>2</sub> 농도가 균일해질 때까지 실험을 진행하였다. 본 연구에서는 온도 측정 실험은 총 5회 반복 실험을 진행하였으며, CO<sub>2</sub> 측정 실험은 총 3 반복 실험을 진행하였다 (Fig. 4).

### 3. CFD를 통한 LMA 예측 모델 설계

#### 가. CFD 모델 설계

본 연구에서는 자돈사의 환기량을 예측할 수 있는 CFD 모델을 설계하였다. 검증을 위한 현장실험 결과로는 열환경 감시를 통한 LMA와 공기 유속을 이용하였다. CFD 전처리 프로그램으로 Design Modeler (Ver 16.0., ANSYS Inc., USA)

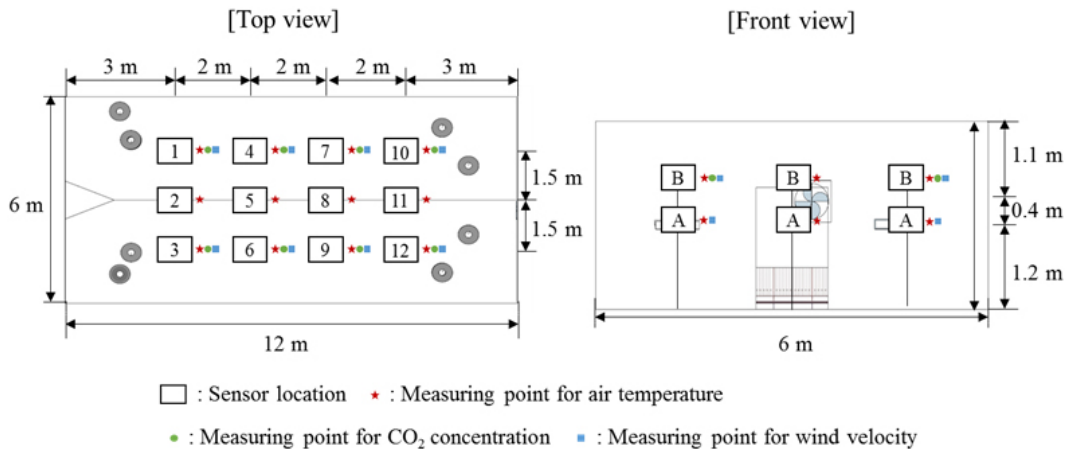


Fig. 3 Information of sensors location for measuring air temperature, CO<sub>2</sub> concentration and wind velocity

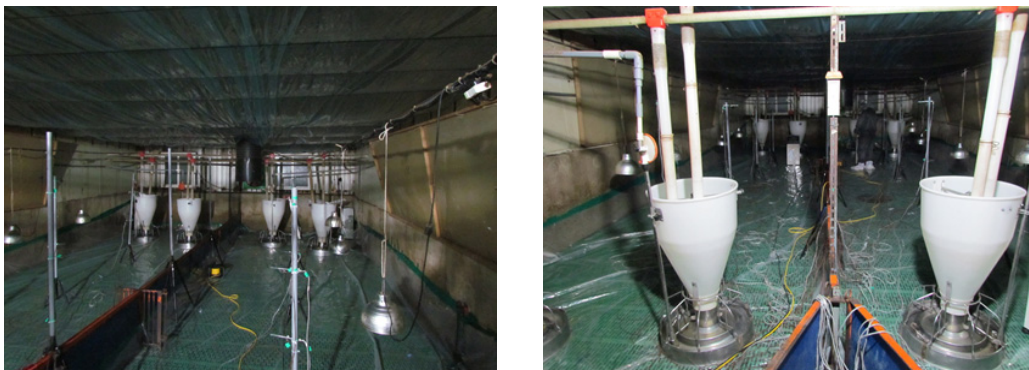


Fig. 4 Measurement of air temperature, CO<sub>2</sub> concentration and wind velocity

를 이용하여 대상 돈사의 실제 규격을 바탕으로 돈사 구조와 환기 구조에 대한 설계를 실시하였다(Fig. 5). 연산 시간을 단축하고 설계의 편의성을 고려하여 유동에 큰 영향을 미치지 않는 합리적인 선에서 시설 내부의 급이기, 내부 파이프 등에 대하여 생략하거나 단순화 작업을 진행하였다. CFD 해석 프로그램으로 Fluent (Ver 16.0., ANSYS Inc., USA)를 사용하였다.

본 연구에서는 현장실험 측정 결과를 바탕으로 외기 온도를 19 °C로 설정하였다. 내부 초기 온도는 열풍기로부터 가열된 온도로서 약 27 °C로 설정하였으며, 기준 압력은 대기압 조건으로 해석하였다. 풍량 측정 결과, 측벽에 위치한 배기팬의 유속은 약 1.44 m/s이며, 굴뚝 배기팬의 유속은 약 2.79 m/s이다. 음압식 환기 방식에 따라 양측 입기구를 Pressure-Inlet으로 설정하였다. 난류 운동 에너지( $k$ ) 및 난류 소산율( $\epsilon$ )은 아래 식으로부터 도출하였으며, 입기구에서 각각 0.063, 0.062로 입력하였다.

$$k = 1.5(\bar{U})^2 \quad (4)$$

$$\epsilon = C_{\mu} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (5)$$

여기서,  $\bar{U}$ 는 내부 평균 유속(m/s),  $l$ 는 난류 강도,  $C_{\mu}$ 는 난류 상수(약 0.09),  $l$ 은 난류 특성 길이(m)이다.

비정상상태로 해석을 수행하였으며, 해석을 위한 Solver로는 Pressure-based solver를 사용하였다. 또한 해석 절차에 유연성을 제공하고 수렴성이 좋은 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 공기는 비압축성 거동을 한다는 가정 하에 밀도를 1.225 kg/m<sup>3</sup>으로 가정하였으며, 점성 계수는 1.7894×10<sup>-5</sup> kg/m·s으로 가정하였다. CFD 해석을 위한 기본 입력자료는 Table 1과 같다.

나. CFD 모델 검증 조건

돈사 내부의 격자크기에 따른 결과의 정확도를 판별하기 위하여 격자독립성 시험을 실시하였다. 격자독립성 시험은 돈사 측벽면의 격자크기를 기준으로 실시하였으며, 격자크기는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 m로 총 4가지 조건에 대하여 분석하였

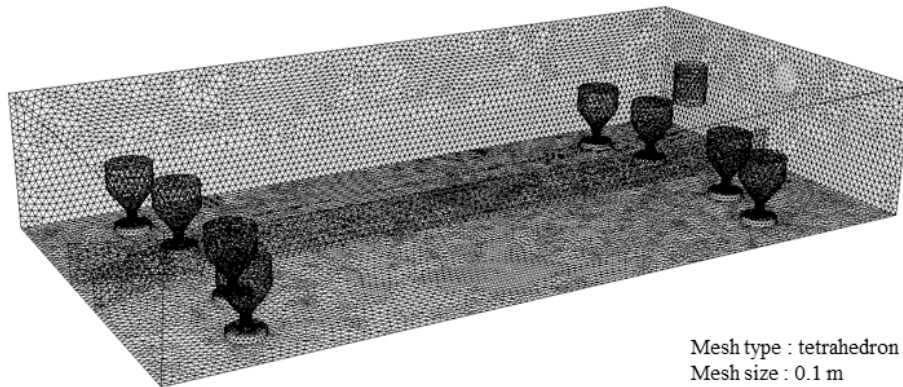


Fig. 5 Design of mesh for CFD validation

Table 1 Characteristics of the numerical procedure and constant input values

Factor	Value	Unit
Solver	Pressure-based solver	-
Numerical algorithm	SIMPLE algorithm	-
Discretization	Second-order	-
Time condition	Unsteady state	-
Wind velocity at side exhaust fan	1,44	m/s
Wind velocity at chimney	2,79	m/s
Operating pressure	101325	Pa
Gravitational acceleration	9,81	m/s <sup>2</sup>
Air density	1,225	kg/m <sup>3</sup>
Air viscosity	1,7894×10 <sup>-5</sup>	kg/m·s

다. 돈사 내부의 격자의 크기가 0.1 m보다 작아질 경우 연산의 시간이 급격히 증가하여 연산 시간의 경제성이 떨어지기 때문에 격자크기 0.1 m를 가장 작은 격자크기로 설계하였다. 돈사 내부 격자크기에 따라 설계된 모델의 총 격자수는 격자 크기가 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 m일 때 각각 1,420,577, 334,280, 247,803, 233,298, 232,736 개다. 격자크기가 커질수록 총 격자수는 감소하였고 격자가 감소하는 비율은 낮아졌다. 이는 측벽면에서의 격자크기가 커지더라도 급이기, 측벽팬, 굴뚝팬 등과 같은 영역에 작은 격자가 들어 가야하기 때문이다.

난류는 불규칙한 3차원 흐름으로 정확한 모의가 거의 불가능하고 시간 및 공간적으로 일정하지 않기 때문에 CFD에서는 주로 난류모델을 통하여 근사해를 도출한다. 현재까지 다양한 난류모델이 개발되었으며, 시뮬레이션 결과의 정확도를 향상시키기 위해서는 해석 모델의 특성과 환경 조건 등을 고려하여 적절한 난류모델을 선정해야한다. 본 연구에서는 다양한 난류 모델 중 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 모델인 Standard k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε, Standard k-ω, SST k-ω 난류모델에 대한 결과를 비교하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. LMA 산정을 위한 현장실험 데이터 보간

LMA 산정식에 따르면 LMA 값은 초기 농도와 수렴 농도 차의 적분값을 초기 농도로 나누어 구할 수 있다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 그래프 하단의 면적을 초기 농도로 나눈 값이 LMA이다. LMA를 산정함에 있어 초기 농도와 수렴 농도가 달라지면 LMA가 달라질 수 있다. 특히 추적가스 농도와 온도의 경우 초기값과 수렴 값의 차이가 크지 않기 때문에 초기 값과 수렴 값의 미세한 차이가 LMA 값의 큰 차이를 초래할 수도 있다. 이에 따라 LMA를 정확히 산정하기 위해서는 초기 농도와 수렴 농도를 적절하게 적용할 필요가 있다.

일반적으로 현장실험에서는 환경 요인들을 최대한 통제하고 실험을 진행한다. 그러나 대부분의 실험에서는 환경 요인들을 완벽하게 통제하는 것은 거의 불가능하며 다양한 변수가 존재한다. 이로 인하여 현장실험으로부터 측정된 추적가스 농도 및 열환경 분포의 값은 변동을 나타낸다. 변동이 있는 현장실험 데이터로부터 LMA를 산정할 시 초기값과 수렴 값의 선택에 따라 LMA가 달라질 수 있다. 따라서 초기값과 수렴 값을 적절하게 선택하기 위하여 현장실험 데이터에 대한 보간을 실시하였다.

환기량 산정 방식 중 대표적인 추적가스 농도 감쇠법에 따르면 추적가스는 아래와 같은 식으로부터 농도 감쇠가 발생한다.

$$C = C_0 e^{-AER(t-t_0)} \quad (6)$$

여기서,  $C$ 는 시설 내부 농도 (ppm),  $C_0$ 는 시설 내부 초기 농도 (ppm),  $AER$ 은 환기량 (1/s),  $t$ 는 시간 (s),  $t_0$ 는 초기 시간 (s)이다.

다음 식에서 초기 농도와 환기량은 고정된 상수이기 때문에 시설 내부 농도는 시간의 흐름에 따른 지수곡선 형태로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 원리로부터 현장실험 데이터를 지수곡선 형태로 보간하였다. 보간한 결과를 바탕으로 초기값과 수렴 값을 결정하였으며, 각 측정점에 대하여 LMA를 산정하였다 (Fig. 6).

#### 2. 추적가스와 열환경 분포를 통한 LMA 산정 결과 비교

본 연구에서는 열환경 분포를 통한 환기량 산정 방법의 적용성을 평가하기 위하여 현장실험을 통하여 측정된 CO<sub>2</sub> 농도 및 내부 기온 결과를 바탕으로 LMA를 산정하였으며, 산정된 값을 비교 분석하였다. 돈방 내부에 약 2,000 ppm의 일정한 CO<sub>2</sub> 농도가 고르게 분포하도록 농도 환경을 조성하고 환기를 시작하였으며, 시간에 따른 돈사 내부의 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하였다. 환기 초기 시점에서의 CO<sub>2</sub> 농도값과 CO<sub>2</sub> 농도가 수렴 되었을 때의 CO<sub>2</sub> 농도값의 차를 농도가 수렴될 때까지의 시간 값으로 나누어 CO<sub>2</sub> 농도에 따른 LMA를 도출하였다. 마찬가지로 총 8개의 지점에서 동일한 방법으로 온도를 통한 LMA를 도출하였다. 환기를 진행하면서 지점별 온도를 측정하였으며, 환기가 진행된 시점과 온도가 수렴된 시점에서의 온도 차를 온도가 수렴될 때의 시간으로 나누어 총 8개 지점의 온도를 이용한 LMA를 산출하였다 (Fig. 7). Fig. 7은 바닥으로부터 1.6 m에서 측정된 돈사 내 CO<sub>2</sub> 및 온도를 이용하여 도출한 LMA를 보여주고 있다. 결과를 보면 각 지점에서 CO<sub>2</sub> 및 온도에 의한 LMA의 경향이 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. CO<sub>2</sub> 통한 LMA와 온도를 통한 LMA는 측정점 B-1과

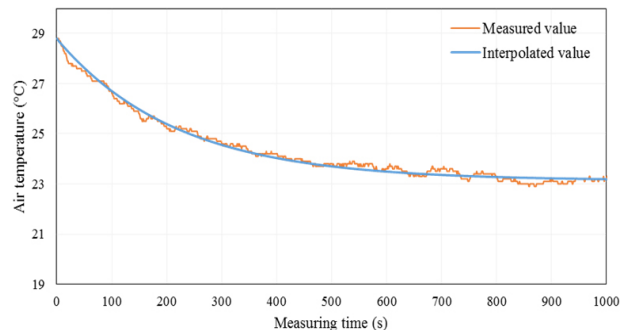


Fig. 6 Interpolation of measured value for determination of LMA

B-3에서 가장 낮은 값을 나타낸다. B-3에서는 CO<sub>2</sub> 통한 LMA와 온도를 통한 LMA가 각각 128 s, 132 s의 값을 갖는다. 또한 B-1에서는 CO<sub>2</sub> 통한 LMA와 온도를 통한 LMA가 각각 137 s, 136 s으로 B-3보다 다소 높은 값을 나타낸다. 측정점 B-1과 B-3에서 LMA가 낮게 형성되는 이유는 입기슬롯 인근에 위치해 있기 때문이다. 입기슬롯에서 신선한 공기가 주입되기 때문에 내부의 공기질이 가장 빠르게 희석되는 것으로 판단된다. 결과를 보면 굴뚝팬과 측벽팬이 위치하고 있는 방향으로 갈수록 LMA 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. CO<sub>2</sub> 통한 LMA와 온도를 통한 LMA는 측정점 B-4, B-6에서 약

140~145 s의 값을 나타내며, 측정점 B-7, B-9에서 약 147~179 s의 값을 나타낸다. 측정점 B-10 및 B-12에서는 CO<sub>2</sub>를 통하여 도출한 LMA 및 온도를 통하여 도출한 LMA가 약 153~176 s의 값을 나타낸다. 이는 출입구 반대편으로 굴뚝팬과 측벽팬이 위치해있어 신선한 공기가 입기슬롯에서 유입되어 배기팬을 통하여 배출되기 때문이다. 입기슬롯 부근에서 외기에 의하여 가장 먼저 희석되고 배기팬 인근은 가장 마지막에 희석되는 것을 의미한다.

CO<sub>2</sub>를 통한 LMA와 온도를 통한 LMA의 비교 분석한 결과를 종합하면 두 결과는 전반적으로 유사한 값을 나타내는 것으로 보인다. 평균 오차 (Average error)는 온도를 이용하여 LMA 값을 도출하였을 경우 CO<sub>2</sub>를 이용하였을 경우보다 전체적으로 약 3.75 s로 낮은 값이 도출되었으며, 평균 제곱근 오차 (Root mean square error; RMSE)는 5.34 s로 평가되었다. 따라서 LMA 값을 도출하고자 하는 공간에 대해서 충분한 단열을 확보한다면 온도를 이용한 LMA 값을 도출하는 것도 타당할 것으로 판단되었다.

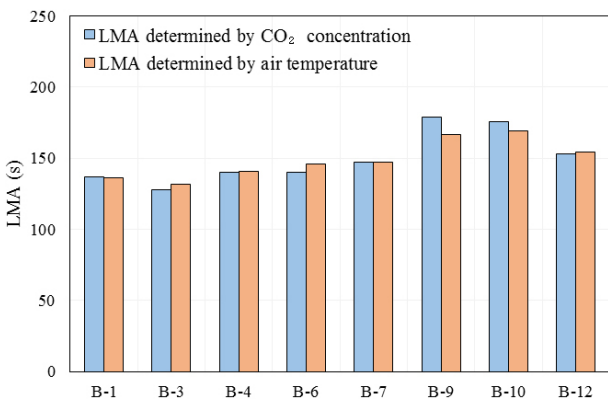


Fig. 7 Comparison between LMA determined by CO<sub>2</sub> concentration and air temperature

### 3. LMA 예측을 위한 전산유체역학 모델 개발

#### 가. 격자독립성 시험 결과에 따른 CFD 모델 검증

CFD 시뮬레이션 모델의 정확도와 연산 소요 시간의 경제성을 위하여 격자크기 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 m에 대해 격자독립성 테스트를 실시하였다. 본 연구에서는 난류모델 5가지에 대해

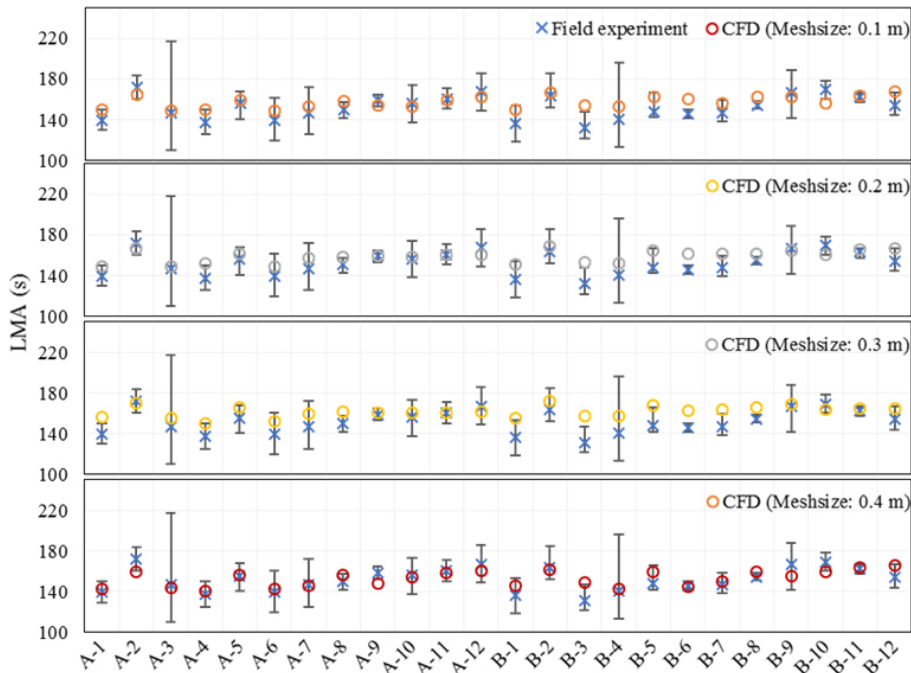


Fig. 8 Comparison of LMA according to mesh size of CFD simulation

**Table 2** Statistical analysis between measured and computed LMA according to mesh size of CFD simulation

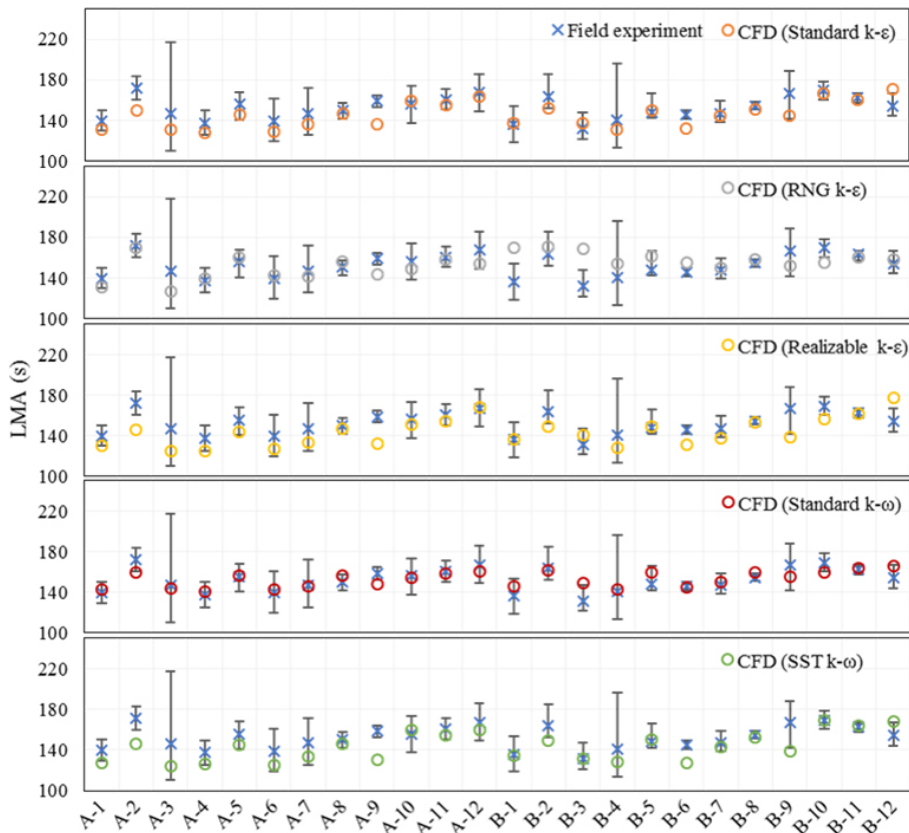
Mesh size	0.1 m	0.2 m	0.3 m	0.4 m
Average error (s)	5.8	10.5	8.5	8.4
RMSE (s)	7.5	12.4	10.1	10.0

모두 격자독립성 테스트를 실시하였으며, 대표적인 케이스로써 Standard k- $\omega$  난류모델 결과를 제시하였다. Fig. 8은 모델의 격자크기에 따라 각 측정 지점에서 산정된 LMA 값을 현장 실측 결과와 비교하여 나타낸 것이며, Table 2는 격자크기에 따라 모든 측정에서 산정된 평균 LMA 결과와 현장 실측 결과를 비교 분석하여 제시한 것이다. Fig. 8을 통하여 격자크기에 따라 CFD 시뮬레이션 결과와 현장 실측 결과를 정성적으로 비교하여 분석하면 격자크기가 0.1 m일 경우 CFD 시뮬레이션 결과가 현장 실측 결과와 가장 잘 맞았으며, 격자크기가 큰 경우에도 큰 차이 없이 대체로 잘 맞는 것으로 결과도 출되었다. 통계적 지표를 통하여 CFD 시뮬레이션 결과와 현장 실측 결과를 비교하면 CFD 시뮬레이션 모델의 격자크기가 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 m일 때 현장 실측으로 산정된 LMA 결과

와의 평균 오차가 5.8, 10.5, 8.5, 8.4 s로 산정되었으며, 평균 제공근 오차는 각 7.5, 12.4, 10.1, 10.0 s로 평가되었다. 평균 오차와 평균 제공근 오차를 통하여 정량적으로 비교해보면 정성적 비교 결과와 동일하게 0.1 m 격자에서 CFD 시뮬레이션 결과가 현장을 가장 잘 묘사하는 것으로 분석되었다. 격자크기가 0.2, 0.3, 0.4 m일 때 큰 차이 없이 CFD 시뮬레이션 결과와 현장 실측 결과가 유사하게 도출되었다. 이는 현장실험에서 측정된 공기유동과 환기량 예측이 가능할 정도로 급이기, 축벽팬, 굴뚝팬 인근에서 작은 격자가 설계되었기 때문이다. 본 연구에 사용된 컴퓨터의 성능으로 연산 시간의 경제성과 연산의 효율성을 고려하면 격자크기는 0.1 m 이상으로 설계해야 한다. 따라서 본 연구에서는 연산을 효율적으로 할 수 있으며 연산의 정확도가 가장 높게 산정된 격자크기 0.1 m인 경우를 적정 격자크기로 선정하였다.

나. 난류모델에 따른 전산유체역학 모델 검증

현장실험을 통하여 실측된 온도 변화 데이터로부터 도출된 LMA 값을 이용하여 CFD 시뮬레이션 모델을 검증하였다. Fig. 9는 난류모델에 따라 각 측정 지점에서 산정된 LMA 값



**Fig. 9** Comparison of LMA according to turbulence model of CFD simulation



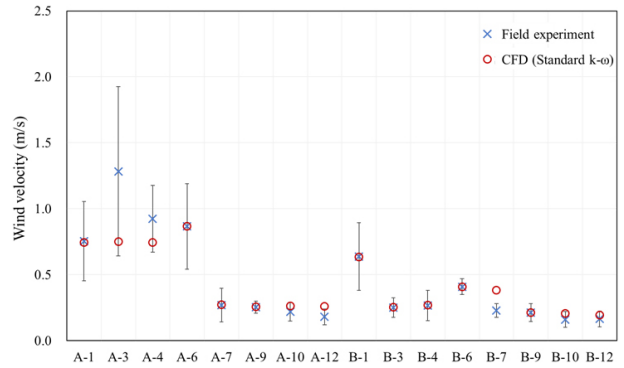
**Table 3** Statistical analysis between measured and computed LMA according to turbulence model of CFD simulation

Turbulence model	Standard k-ε	RNG k-ε	Realizable k-ε	Standard k-ω	SST k-ω
Error (s)	9,1	10,1	11,4	5,8	10,7
RMSE (s)	11,3	13,7	14,2	7,5	13,8

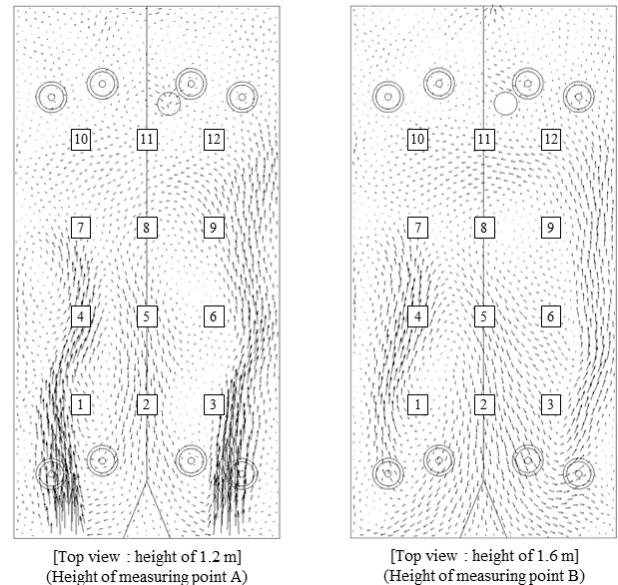
을 현장 실측 결과와 비교하여 나타낸 것이며, Table 3에는 이를 정량적으로 비교 분석하기 위하여 현장 실측 결과와 CFD 시뮬레이션 결과의 평균 오차와 평균 제곱근 오차를 산정하여 나타내었다. Fig. 9에서 현장실험의 경우 반복적으로 수행되었기 때문에 결과를 평균값과 오차막대로 나타내었다. 난류모델에 따라 현장실험과 비교한 결과를 보면 Standard k-ω 난류모델을 이용한 경우에만 모든 측정에서의 CFD 시뮬레이션 결과가 현장실험 결과의 범위 안에 포함되며, 다른 난류모델의 경우에는 CFD 시뮬레이션 결과가 현장실험 결과의 범위에서 벗어나는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 9를 통하여 정성적 비교 결과를 보면 Standard k-ω 난류모델을 이용하는 것이 현장실험과 비교하여 가장 정확한 결과를 도출하는 것으로 판단된다. 추가적으로 정량적인 비교를 위하여 Table 3에 나타낸 바와 같이 통계적 지표들을 산정한 결과에 따르면 Standard k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε, Standard k-ω, SST k-ω, LES 난류모델을 이용하였을 경우 평균 오차는 각 9.1, 10.1, 11.4, 5.8, 10.7, 29.7 s로 산정되었으며, 평균 제곱근 오차는 각 11.3, 13.7, 14.2, 7.5, 13.8, 29.7 s로 도출되었다. Standard k-ω 난류모델을 사용한 경우 평균 오차와 평균 제곱근 오차가 다른 난류모델을 이용한 경우보다 작아 현장실험과 가장 가깝게 모의하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 정성적, 정량적 분석을 통하여 돈사 내 LMA 분석을 위한 적정 난류모델로써 Standard k-ω 난류모델을 선정하였다.

**다. LMA 예측을 위한 CFD 모델 검증**

앞서 검증된 CFD 시뮬레이션 모델을 이용하여 돈사 내부 유동 및 열 환경을 모의하였으며, 모의 결과를 바탕으로 환기에 따른 온도 감소를 분석하여 산정된 LMA 값과 돈사 내 유속 분포를 비교 분석하였다. 이를 위하여 각 측정에서의 유속을 비교하여 Fig. 10에 나타내었으며, 측점이 위치한 1.2, 1.6 m 높이(돈사바닥면 기준)의 유속 분포를 Fig. 11에 나타내었다. 앞서 제시한 Fig. 9를 통하여 알 수 있듯이 입기창에서 거리가 가까운 측정점들 LMA가 낮게 산정되며, 입기창에서 거리가 멀어질수록 LMA가 높게 산정되는 결과가 도출되었다. 이는 Fig. 11에서 나타낸 바와 같이 입기창 주변에서 다른 구역들에 비해 유속이 빨라 환기가 원활히 이루어지기 때문으로 판단된다. 또한 입기창과 배기구 주변에 위치한 측정점에서 돈



**Fig. 10** Comparison between measured and computed wind velocity



**Fig. 11** Wind velocity vector at floor plan of height of 1.2 and 1.6 m (Height of measuring point A and B)

사 내 다른 측정점들보다 현장실험을 통한 LMA 결과들의 편차가 크게 측정되었다. 이는 돈사에서 강제 환기팬을 이용함에 따라 입기창과 배기구 주변 공기의 유동이 안정화되지 않았기 때문으로 판단된다. 현장실험을 통하여 산정된 평균 LMA는 152.2 s, CFD 시뮬레이션을 통하여 산정된 평균 LMA는 153.1 s로 현장실험과 CFD 시뮬레이션 결과는 약 0.9 s의 작은 차이를 보인다.

추가적으로 Fig. 11을 통하여 각 측정에서의 유속을 분석한 결과를 보면 입기창 앞쪽에 위치하는 A-1, 3, 4, 6의 경우 유속이 약 0.8~1.2 m/s로 형성되었지만, 입기창과 거리가 먼 측정점과 입기창보다 높이 위치한 측정점에서는 유속이 약 0.2~0.4 m/s로 매우 낮게 형성되었다. 전체적인 유동의 경향을 분석한 결과에 따르면 CFD 시뮬레이션을 통하여 산정된 온실 내부의 유동이 측정 A-3을 제외하고 현장실험과 경향이 매우 유사하게 도출되었다. 측정 A-3의 경우 본 연구에서 사용된 열선 풍속계의 계측 오차 범위가 0~4.99 m/s 범위의 유속을 측정할 때  $\pm 0.15$  m/s인 점, A-3 측정점의 위치가 입기창 앞쪽에 위치하여 안정화된 유동이 형성되지 않았을 가능성, 현장에서의 예측 불가능한 요인들을 고려하였을 때 A-3의 결과 역시 유의미한 것으로 판단된다. 현장실험과 CFD 시뮬레이션 결과의 평균 오차가 약 0.07 m/s, A-3 측정점의 데이터를 제외했을 경우 평균 오차가 약 0.04 m/s로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 설계된 CFD 시뮬레이션 모델이 현장과 유사하게 모의하여 돈사의 LMA 산정 및 유동 분석에 적합한 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 유동 추적법의 공기연령 이론법을 바탕으로 추적가스가 아닌 열환경을 분석하여 돈사 내의 환기량을 산정하고, 이를 바탕으로 환기량을 예측할 수 있는 CFD 모델을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 자돈사 내에서 현장실험을 통하여 외부 기상 및 내부 환경 조건, 온도(열환경 분포), 유속 분포, CO<sub>2</sub>(추적가스) 농도를 측정하였다. 현장실험을 통하여 측정된 결과로부터 추적가스 농도 감쇠를 통한 LMA와 열환경 분포 감쇠를 통한 LMA를 산정하였다. 산정한 LMA 결과를 서로 비교 분석하여 열환경 분포로부터 도출한 LMA의 적용성을 평가하였다. 다음으로 돈사의 환기량 예측을 위한 CFD 모델을 개발하기 위하여 CFD 모델을 설계하였으며, 현장실험으로부터 도출한 LMA와 공기유동 결과를 이용하여 모델 검증 실시하였다.

연구 결과에 따르면 추적가스 농도 감쇠를 통한 LMA와 열환경 분포 감쇠를 통한 LMA 값이 전반적으로 유사한 경향이 분석되었다. 추적가스 농도 감쇠를 통한 LMA와 열환경 분포 감쇠를 통한 LMA 값의 정량적 통계적 지표는 평균 오차는 약 3.76 s, 평균 제공근 오차는 5.34 s로 도출되었다. 이에 따라 추적가스 농도 감쇠를 통한 LMA와 열환경 분포 감쇠를 통한 LMA 값의 차이는 매우 작은 것으로 판단되었다. 따라서 LMA 값을 도출하고자 하는 공간에 대해서 충분한 단열을 확보한다면 온도를 이용한 LMA 값을 도출하는 것도 타당할 것으로

판단되었다. CFD 모델의 검증 결과에 따라 적정 격자크기는 0.1 m, 적정 난류모델은 Standatd k- $\omega$  모델로 선정하였다. 최종적으로 설계된 CFD 모델의 연산 결과와 현장실험의 결과를 통계적 지표로 분석하였다. CFD 모델 결과와 현장실험 결과의 평균 오차는 5.8 s, 평균 제공근 오차는 7.5 s로 매우 작게 도출되었다. 따라서 본 연구에서 설계한 모델은 돈사 내 환기량을 평가하기 위한 모델로서 적합한 것으로 판단된다. 또한 검증된 CFD 모델을 통하여 자돈사 뿐만 아니라 다른 농업시설의 환기 효율성도 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호:PJ012038012017)의 지원에 의하여 이루어진 것임.

#### REFERENCES

1. De Jong, T., 1990. *Natural ventilation of large multi-span greenhouses*: Proefschrift Wageningen.
2. Goedhart, M., E. Nederhoff, A. Udink ten Cate, and G. Bot, 1983. Methods and instruments for ventilation rate measurements III. *International Symposium on Energy in Protected Cultivation* 148.
3. Han, H. T., C. Y. Shin, I. B. Lee, K. S. Kwon, and Y. I. Kwon, 2009. Estimation of local mean ages of air in a room with multiple inlets. *The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*. 148-153 (in Korean).
4. Hong, S. W., I. B. Lee, H. S. Hwang, I. H. Seo, J. 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 greenhouses in Korea. *Transactions of the ASABE* 51(4): 1417-32.
5. Kwon, K. S., I. B. Lee, H. T. Han, C. Y. Shin, H. S. Hwang, S. W. Hong, J. Bitog, I. H. Seo, and C. P. Han, 2011. Analysing ventilation efficiency in a test chamber using age-of-air concept and CFD technology. *Biosystems Engineering* 110(4): 421-33.
6. Liang, H., 1994. Room Air Movement and Contaminant Transport. Ph.D. thesis. Department of Mechanical Engineering. University Minnesota.
7. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2016. Major statistics data of Agriculture, Food and Rural Affairs. 11-1543000-000128-10. (in Korean)
8. Morris, L. G. and F. Neale, 1954. Infrared carbon dioxide gas analyser and its use in glasshouse research. National Institute of Agricultural Engineering.

9. Nederhoff, E., J. Van de Vooren, and A. J. Udink ten Cate, 1985. A practical tracer gas method to determine ventilation in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 31(4): 309-19.
10. Okada, M. and T. Takakura, 1973. Guide and data for greenhouse air conditioning. *Journal of Agricultural Meteorology* 28(4): 223-30.
11. Sandberg, M., 1981. What is ventilation efficiency?. *Building and environment* 16(2): 123-35.
12. Sandberg, M. and M. Sjöberg, 1983. The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms. *Building and environment* 18(4): 181-97.
13. Seo, I. H., I. B. Lee, S. W. Hong, H. S. Hwang, J. Bitog, J. I. Yoo, K. S. Kwon, T. H. Ha, and H. T. Kim, 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).
14. Sherman, M. H., 1990. Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. *Building and Environment* 25(4): 365-74.
15. Song, S. H., I. B. Lee, K. S. Kwon, T. H. Ha, J. 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(3): 37-45 (in Korean).
16. Whittle, R. and W. Lawrence, 1960. The climatology of glass-houses. II. *Ventilation. Journal of Agricultural Engineering Research* (5): 36-41.
17. Yoo, J. C., J. B. Lee, and K. H. Jung, 1997. The Study on heat exchanger with in-outlet fan for livestock building. Konkuk univ: MIFAF.