



전산유체역학 기법을 이용한 공기연령 산정 방법의 개발

Development of Straightforward Method of Estimating LMA and LMR using Computational Fluid Dynamics Technology

박세준* · 이인복*† · 홍세운** · 권경석* · 하태환* · 윤남규*** · 김형권**** · 권순홍*****

Park, Se-Jun · Lee, In-Bok · Hong, Se-Woon · Kwon, Kyeong-Seok ·

Ha, Tae-Hwan · Yun, Nam-Gyu · Kim, Hyung-Gewon · Kwon, Sun-Hong

ABSTRACT

Ventilation efficiency has an important role in agricultural facilities such as greenhouse and livestock house to keep internally optimum environmental condition. Age-of-air concept allows to assess the ventilation efficiency of an agricultural facility according to estimating the ability of fresh air supply and contaminants emission using LMA and LMR. Most of these methods use a tracer gas method which has some limitations in experiment like dealing unstable and invisible gas. Therefore, the aim of this study was to develop a straightforward method to calculate age-of-air values with CFD simulation which has the advantage of saving computational time and resources and these method can solve the limitations in experiment using tracer gas method. The main idea of LMA computation is to solve the passive scalar transport equation with the assumption that the production of the time scalar throughout the room is uniform. In case of LMR calculation, the transport of the time scalar was reversed compulsively using UDF. The methodology to validate the results of this study was established by comparing with preceding research that had performed a computing LMA and LMR value by laboratory experiments and CFD simulations using tracer gas. As a result, the error was presented similarly level of results of preceding research. Some big errors could be caused by stagnated area and incongruity turbulence model. while the computational time was reduced to almost one fourth of that by preceding research.

Keywords: Age-of-Air; Computational Fluid Dynamics; LMA; LMR; Passive Scalar Transport Equation

1. 서 론

온실, 축사 등과 같은 농업 시설에서의 환기는 내부의 적정 생육환경을 조성하는데 필수적이며 에너지 절감 문제에 있어서 중요한 인자이다. 온실의 경우 적당한 상대습도 조건은 작물의 생육 및 과실비대를 촉진시켜 생산성을 증가시키지만 과습한 상태가 지속될 경우 병충해 발생을 증가시키는 주요한 원인이 된다 (Lee, 2004). 또한 축사의 경우, 사료와 가축의 배설물 등으로부

터 분진, 가스 등이 배출되며 축적되는데, 이는 가축의 생장능력을 저하시키고 가축 및 사람의 호흡기 질환 및 불쾌감을 유발하는 요소이다 (Zhaung et al., 2002). 이와 같이 시설 내에서 재배하는 작물과 가축의 적정 생육환경을 조성하고 오염물질을 배출하기 위한 방법으로 환기는 중요한 요소이며, 실제로 Shin et al. (2001)과 Cho et al. (2010)은 농업시설 내 환기 방법을 개선함으로써 참외와 수박의 질병 발생을 저감하고자하는 연구를 수행하여 환기의 역할 및 중요성을 강조한 바 있다.

한편 환기는 농업시설 내부의 오염물질 배출과 습도조절 등의 측면뿐만 아니라 에너지 절약 측면에서도 그 중요성을 찾을 수 있다. 우리나라의 경우 지구온난화와 기후변화가 가속화됨에 따라 여름철과 겨울철의 극심한 고온과 저온현상이 빈번해 지며 이는 농업 시설에 필요한 냉·난방 에너지 증가로 이어지고 있다. 따라서 겨울철의 경우 시설 내·외부의 극심한 온도 차이에 의한 난방에너지 소모를 줄이기 위해 최소 환기로 운영된다. 그러나 이러한 운영은 축사 내 여러 오염물질과 많은 분진 축적을 야기시키며, 시설 내부의 습도 조절 또한 어렵게 하기 때문에 가축의 생

* 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 & 농업생명과학연구원

** M3-BIORES, Katholieke Universiteit Leuven

*** 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 재해예방공학과

**** 농촌진흥청 국립원예특작과학원 시설원예시험장

*****부산대학교 생명자원과학대학 바이오산업기계공학과 교수

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

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: iblee@snu.ac.kr

2013년 11월 4일 투고

2013년 11월 8일 심사완료

2013년 11월 11일 게재확정

장 저해와 질병의 발생을 증가시킨다 (Kwon et al., 2011). 따라서 에너지 절약 측면과 농업 시설 내 적절한 생육조건 조성 모두를 만족하기 위하여 효율적인 환기의 중요성은 점점 더 커지고 있다.

이에 따라 농업시설의 환기를 평가하기 위한 수많은 연구들이 진행되어왔다. 시설 전체의 환기량만을 고려한 초기 선행연구들에서 시설 내부의 지역적인 환기량을 고려하는 연구들까지 진행되었지만 환기량을 정량화하는 현장 실험 과정에서 많은 한계점이 존재했다 (Kwon et al., 2011). 이를 극복하기 위하여 전산유체역학을 이용한 환기량 산정연구가 진행되었으며, 대표적으로 Bartak et al. (2001)과 Kwon et al. (2011)과 같은 연구들이 진행되었다. 그러나 이러한 두 연구 역시 검증과정과 편의성 면에서 한계점을 갖기 때문에 현재까지 농업시설에서 환기량의 정량화 연구는 보완점이 필요한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 Bartak et al. (2001)의 연구를 참고하여 유체의 지배방정식을 전산유체역학을 통해 해석하였으며, LMA 값뿐만 아니라 기존 대부분의 선행연구들이 산정하지 않았던 LMR 값을 계산하였다. 이러한 방법은 추적가스의 유동과 대상 시설 내부의 공기의 유동을 계산하여야 하는 CFD 시뮬레이션에 추적가스기법을 이용하여 공기연령을 산정한 Kwon et al. (2011)의 연구와는 달리 대상 시설 내부의 공기의 유동만을 계산하기 때문에 짧은 공기연령 산정 시간과 적은 컴퓨터메모리를 필요로 한다. 따라서 본 연구의 결과는 Kwon et al. (2011)이 진행하였던 현장실험을 통해 산정된 공기연령 값과 본 연구의 시뮬레이션을 통하여 산정된 공기연령 값을 비교하여 그 타당성을 판정하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 환기 정량화 연구

농업시설 내의 적절한 환경 조절을 위한 적정 환기 수준을 설계하고 적절한 입기구와 배기구의 설계를 위해선 환기량을 정량화하는 것이 고려되어야 하며 이를 위한 연구들이 선행되어 왔다.

초기 환기 효율을 정량화하는 연구들의 경우 에너지 수치 모델 방법 (Kozai et al., 1980; Chalabi and Bailey, 1989; Fernandez and Bailey, 1992; Boulard et al., 1993; Boulard and Draoui, 1995; Lee and Short, 2000), tracer-gas method (Bot, 1983; De Jong, 1990; Lawrence and Whittle, 1960; Okada and Takakura, 1973; Morris and Neale, 1954; Nederhoff et al., 1985), pressure difference model ((Boulard et al., 1996; Kittas, et al., 1996; Papadakis et al., 1996)와 시설 내·외부 압력차를 이용한 모델 방법 (Boulard et al., 1996; Kittas et al.,

1996; Papadakis et al., 1996) 등이 연구되었다. 그러나 이러한 전통적인 방법들은 시설 전체의 환기량을 환기율의 대표 값으로 산정하기 때문에 내부 국부적인 환기량의 차이를 정확히 평가하는데 한계가 있다 (Kwon et al., 2011). 시설농업과 같은 실내에서의 오염물질 농도에 대해 실내 환기의 적정성을 판단하려는 경우, 동일한 설계 환기량을 가질 지라도 각 시설의 환기구 위치 및 용적에 따라 실내의 오염물질의 농도는 다른 거동을 보이기 때문이다 (Cheon, 2006; Hong et al., 2008).

따라서 이러한 전통적인 방법들은 시설 전체의 환기량을 추정하는 데에는 유용하지만, 오늘날 대형화되어 가고 있는 대규모 농업 시설들에 있어서는 국부적인 환기량을 알 수 없기 때문에 환기의 지역적 평가나 환기가 잘 되지 않는 정체구간에 대한 대응마련에 어려운 점을 갖는다.

따라서 시설 전체의 환기량 뿐만 아니라 지역적인 환기량도 고려하기 위하여 Hong et al. (2008)과 Seo et al. (2008)과 같은 연구에서 Tracer-gas decay model 방법이 연구된 바 있으며, Sandberg와 Sioberg (1983)의 연구에선 공기 연령 (age-of-air) 이론 (Sandberg and Sjoberg, 1983)이 제시되었다. 특히 공기 연령 이론의 경우 환기량 산정에 있어 시간개념을 도입함으로써 환기를 효율적 측면으로 평가 할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 Tracer-gas decay model의 경우 실험을 위하여 대상 공간 내부에 추적 가스의 농도를 일정하게 유지시켜야 하는 어려움이 존재하며, 비가시적이고 무형적인 가스를 제어해야하는 어려움이 더해진다. 공기 연령 이론의 경우 그 산정 실험법이 추적가스법을 기반으로 하였기 때문에 동일한 문제점을 가지며 이러한 추적가스를 이용한 실험의 경우 가스농도의 점측정과 항상 변화하는 외기상황으로 인해 실험결과의 신뢰도를 낮추게 된다.

그러나 앞서 언급된 문제점은 전산유체역학을 이용한 시뮬레이션 기법을 통해 극복이 가능하다. 전산유체역학은 시뮬레이션을 이용하여 공기와 가스 등의 유동을 모의할 수 있기 때문에 가스를 다루는 실험에서 기인할 수 있는 오차들을 제거 할 수 있다. 실제로 Kwon et al. (2011)은 Computational Fluid Dynamics (CFD)시뮬레이션에 추적가스의 흐름을 모의하여 배기구의 위치에 따른 공기 연령을 산정한 바 있다. 그러나 Kwon et al. (2011)의 연구방법은 시뮬레이션 과정 중 공기의 유동뿐만 아니라 추적가스의 유동 또한 모의해야하기 때문에 해석해야 하는 방정식의 수가 늘어나게 된다. 따라서 연산 시 필요한 컴퓨터 메모리가 증가하게 되며 이에 따라 연산시간이 늘어나는 단점이 있다. 이 뿐만 아니라 LMR 값 산정의 경우 현장 실험 시 수많은 반복실험을 동일한 초기 조건하에 시행해야 한다는 어려움이 존재하며 시뮬레이션을 통해 산정할 시에도 산정하고자 하는 LMR 값의 개수에 따라 시뮬레이션을 시행하여야 하는 단점이 있다.

이러한 한계점들을 극복하기 위한 방안으로 Bartak et al.

(2001)이 제시한 전산유체역학과 유체 지배방정식의 풀이를 통한 공기연령 산정법이 있으며 해당 연구는 해석 공간의 격자망의 조밀한 정도에 따라서 계산된 LMA 값과 추적가스법을 이용한 현장실험으로 산정된 LMA 값을 비교 연구하였다. 이러한 공기 연령 산정법은 CFD 시뮬레이션 과정 중 추적가스의 흐름을 제외한 공기의 흐름만을 모의하기 때문에 추적가스에 대한 수송방정식의 풀이가 생략되며 이에 따라 공기 연령 산정 시간의 상당한 감소를 이루게 된다.

2. Passive scalar Transport equation (PSTE)

본 연구에서는 LMA 값 산정을 위해 Bartak et al. (2001)이 제시한 유체의 유동 방정식을 전산유체역학을 이용하여 풀이함으로써 공기연령 값인 LMA를 산정하였다. 이와 같은 방법은 대상 공간 안의 공기 외에 추적가스와 같은 추가적인 유체의 흐름을 모의할 필요가 없기 때문에 풀이해야 할 방정식의 수가 적으며 이는 계산 과정의 편의성을 증가시킬 뿐만 아니라 계산시간의 엄청난 감소로 이어진다. 따라서 LMA 산정의 경우, 식 (1)의 Bartak et al. (2001)이 제안한 유체의 유동방정식을 Φ 에 대하여 풀이함으로써 LMA 값을 구할 수 있다. 본 연구에선 Bartak et al. (2001)이 제시한 아래의 식 (1)을 Passive Scalar Transport Equation (PSTE)으로 정의하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \Phi - \vec{J} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}) = \rho \quad (1)$$

$$\vec{J} = -(\rho D_m + \rho D_t) \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 해석 공간 내부의 유체 밀도 (kg/m^3)를 의미하며 \vec{u} 는 유체의 유속 (m/s), x_i 는 단위 길이 (m), \vec{J} 는 유체의 확산항 ($kg/(m^2 \cdot s)$), D_m 는 분자의 이류확산계수 (m^2/s), D_t 는 분자의 난류확산계수 (m^2/s), Φ 는 LMA 값 (s)을 의미한다.

3. 공기 연령 (Age-of-air) 이론

공기연령이란 실내로 유입된 공기가 임의의 지점까지 도달하는 시공간에 대해 평균한 값을 의미하는 개념으로 시간 단위를 갖는다. 일반적으로 외부로부터 유입된 공기는 임의의 지점까지 다양한 경로를 통해 도달하게 되는데 이 때 각 경로를 통해 임의의 지점까지 도달한 시간의 평균값을 국소 평균 공기연령 (Local Mean Age, LMA)이라 한다. 반대로 임의의 지점에서 다양한 경로를 통해 배기구까지 도달하는 각 시간의 평균값을 국소 평균 잔여체류시간 (Local Mean Residual life time, LMR)이라 정의

한다 (Sandberg and Sjoberg,1983). 공기연령은 환기량 산정에 있어서 시간 개념을 도입하였기 때문에 환기를 효율적 측면에서 평가할 수 있을 뿐만 아니라 공기가 이동하는 평균 경로를 고려하기 때문에 기존의 환기효율을 평가하는 방법들과 달리 공기의 흐름과 실제적인 유동을 반영할 수 있다는 강점을 갖는다.

LMA와 LMR을 계산하기 위해선 추적가스의 주입 방법에 따라 짧은 시간 동안에 추적가스를 주입하는 펄스법 (the pulse method), 급기구에서 연속적으로 추적가스를 발생시키는 채승법 (step-up method), 실내에서 추적가스의 농도를 일정하게 유지시킨 후 농도감쇠를 측정하는 채강법 (step-down method)과 같이 세 가지 추적가스법이 사용된다.

위에서 제시된 3가지 추적가스법은 각각의 주입 방법에 따라서 LMA와 LMR 계산을 위한 수식의 형태는 다르나 동일한 공기 연령 값을 얻기 때문에 본 연구에선 실험적으로 구현하기 쉽다고 알려진 채승법 (step-up method)를 채택하였으며 다음 두 식 (3)과 (4)는 Fig. 1을 참고 할 때 각각의 점 P에서 추적가스를 이용하여 LMA와 LMR값을 계산하는 공식이다.

$$LMA_p = \int_0^\infty \left(1 - \frac{C_p^{sup}(t)}{C_\infty}\right) dt \quad (3)$$

$$LMR_p = \int_0^\infty \left(1 - \frac{C_{ex}^p(t)}{C_{ex}^p(\infty)}\right) dt \quad (4)$$

여기서, C는 추적가스의 농도 (ppm)를 의미하며 식 (3)에서 하첨자 p는 공기연령의 산정 대상 공간 안에서의 임의의 측정지점을 의미하며 상첨자 sup는 추적가스가 주입된 위치가 입기구임을 의미한다. 또한 식 (4)에서 하첨자 ex는 공기연령의 측정점이 배기구임을 의미하며 상첨자 p는 임의의 가스발생지점을 의미한다. C_∞ 는 시간이 충분히 흐른 후의 정상상태농도 (ppm)를 의미하며, 실내 어느 지점에서나 균일한 값을 갖는다. $C_{ex}^p(\infty)$ 는 정상상태 도달 후 배기구에서의 농도 (ppm)를 의미한다. LMA_p 는 실내 임의의 지점인 P점에서의 국소평균연령 (s), LMR_p 는 실내 임의의 지점인 P점에서의 국소 평균 잔여체류시간 (s)을 의미한다.

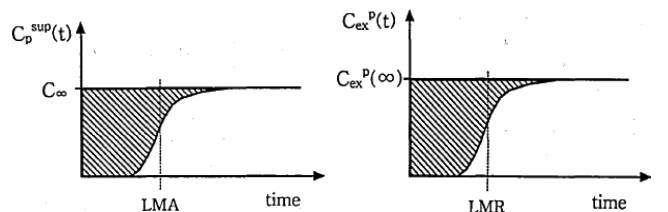


Fig. 1 Concentration curves measured at a designated point "p" after step-up injection of tracer gas

4. 시뮬레이션 모델 설계

가. 시뮬레이션 툴

전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD)은 유체를 포함하는 시스템에 대하여 유체의 흐름이나 열전달, 화학작용 등을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 해석할 수 있는 수치해석 분석 도구이다. 전산유체역학은 비선형 미분 방정식인 Navier-stoke equation을 지배방정식으로 하며 유한차분법을 이용해 수치해석을 모의하는 도구이다. 기계, 항공, 화학공학, 제조, 토목 및 건축, 환경 분야를 비롯해 다양한 분야에서 활발히 이용되고 있으며 최근에는 축산 시설 및 온실 환경 분석 등 농업 분야에서도 활발한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 환기 효율을 나타내는 지표 중 하나인 공기연령을 산정하기 위해 전산유체역학 상용 프로그램인 GAMBIT (ver. 2.4.6, Fluent Co. New Hampsher, USA)을 통하여 간단한 대상 구조를 설계하였고 3차원 격자망 구조를 형성하였다. 또한 공기연령 산정을 위한 유동 방정식 해석은 FLUENT (ver. 6.4.5, Fluent Co. New Hampsher, USA)를 사용하였다. GAMBIT은 2차원 혹은 3차원의 격자망을 설계하며, 실험하고자 하는 조건에 맞는 경계조건들을 입력해주는 GUI (Graphical User Interface) 기반의 프로그램이다. 본 연구에서는 간단한 3차원의 대상공간을 설계한 후 격자망을 구성하여 분석하고자 하는 case에 맞는 경계조건을 지정하는데 이용하였다. 연산프로그램인 FLUENT는 c언어를 기반으로 만들어진 수치해석 프로그램으로써 질량, 에너지, 운동량 보존 법칙을 기반으로 만들어졌다. 계산에 이용되는 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \tau + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho h + P)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau} \vec{v})) + S_h \quad (7)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도 (kg/m^3)를 의미하며 \vec{u} 는 유체의 유속 (m/s), P 는 정압 (Pa), $\vec{\tau}$ 는 응력 텐서 (Pa), \vec{g} 는 중력가속도 (m/s^2), F_i 는 외력 (N/m^3), S_m 는 화학반응에 의해 생성되는 질량 소스 (kg/m^3), k_{eff} 는 유효 전도율 ($kg/m^2 s^1$), T 는 온도 (K), h 는 단위 질량당의 엔탈피를 나타내는 비엔탈피 (J/kg), x_i 는 단위 길이 (m), t 는 시간 (s), \vec{J}_j 는 j 종의 확산 플럭스 ($kg/(m \cdot s)$),

S_h 는 화학반응이나 복사에 의한 엔탈피 증가 ($kg/(m \cdot s^3)$)를 의미한다.

나. 시뮬레이션 모델 설계

대상 구조는 Kwon et al. (2011)의 연구에 설계되었던 구조와 동일한 구조이며, 이는 Kwon et al. (2011)의 연구 결과로 산정된 LMA, LMR 값과 본 연구의 결과로 산정된 LMA, LMR 값을 동일한 조건하에 비교 분석하기 위함이다. 따라서 본 연구의 대상 구조는 CFD 상용 프로그램인 GAMBIT을 이용하여 Fig. 2와 같이 폭이 0.1 m, 높이가 1.2 m, 길이가 1.8 m인 직육면체로 설계되었다. 입기구와 배기구는 폭이 0.1 m, 높이가 0.025 m, 길이가 0.1 m인 직육면체로 설계되었다. 또한 입기구의 위치는 Fig. 2의 왼쪽 상단부분, 배기구의 위치는 Case1, Case2, Case3 별로 각각 오른쪽 위와 오른쪽 아래, 왼쪽 아래에 위치한다. 만들어진 각각의 영역은 Table 1과 같이 각각의 case별로 Inlet과 Outlet 경계조건과 나머지 Wall부분의 경계조건이 설정되었다.

Fig. 2에 나타난 P점들은 공기연령 값인 LMA와 LMR값이 산정되는 위치이며 각각은 높이 0.24 m, 좌우 0.36 m의 등간격을 갖도록 설계하였다.

다. 시뮬레이션 연산 방법

시뮬레이션의 연산을 위한 FLUENT 프로그램의 입력 값들은 Table 2와 같이 설정하였다. 온도는 Kwon et al. (2011)의 연구에서 현장 실험 당시 실험실 온도로 알려진 288.16K로 설정

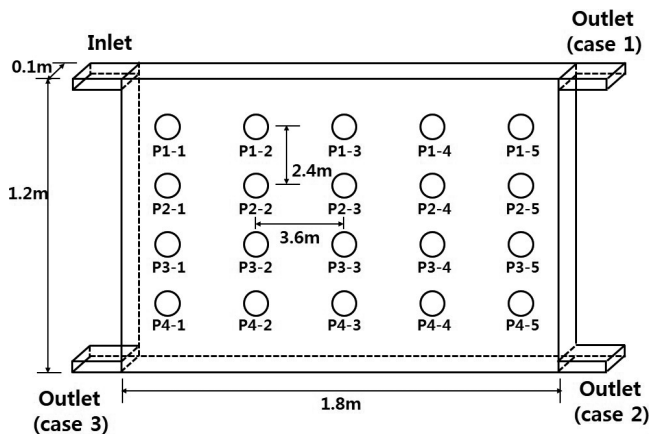


Fig. 2 The designated study points for the CFD simulation

Table 1 Boundary Conditions for the CFD simulation model

| Case | Wall | Inlet | Outlet1 | Outlet2 | Outlet3 |
|--------|------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Case 1 | | | pressure outlet | wall | wall |
| Case 2 | wall | velocity inlet | wall | pressure outlet | wall |
| Case 3 | | | wall | wall | pressure outlet |

Table 2 Constant input values of the CFD simulation model

| Content | Value | Unit |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------|
| Operating temperature | 288.16 | K |
| Gravitation acceleration | 9.81 | m/s ² |
| Specific heat of air | 1006.43 | J/(kg·K) |
| Density of air | 1.225 | kg/m ³ |
| Velocity Magnitude at inlet | 2.88 | m/s |
| Viscosity of air | 1.86×10 ⁻⁵ | kg/(m·s) |
| Molecular weight of air | 28.966 | g/mol |

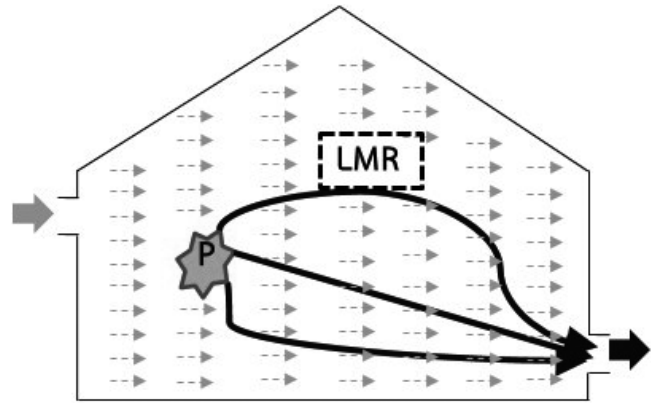
하였으며, 입기구에서의 유입속도는 2.88 m/s로 설정하였으며, 그 외의 입력 값들은 다음과 같다.

먼저 LMA 산정의 경우 앞서 제시된 Passive scalar transport equation과 같은 유체의 유동방정식을 전산유체역학 시뮬레이션에 반영하기 위하여 Fluent의 User-Defined Scalar (UDS) 기능과 c언어를 기반으로 하는 User-Defined Function (UDF) 기능을 이용하였다. 또한 식 (2)에서 확산항을 의미하는 \vec{j} 항은 UDF로 구현하였으며, 이때 \vec{j} 항의 계산식에 필요한 S_d 값은 일반적인 공기의 S_d 값인 0.7로 설정하였으며 ρD_m 의 값은 0.00002로 설정하였다.

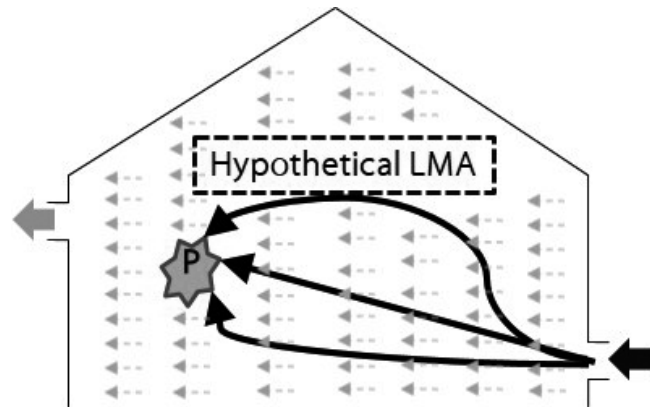
한편 LMR 값을 산정하기 위한 유동 방정식이 존재하지 않기 때문에 LMA 산정을 위한 유동 방정식의 형태를 이용하여 간접적으로 구하는 방식을 고안하였다. Fig. 3에서 (a)는 시설 내부의 임의의 점P에서 발생한 가스가 배기구로 나가는 여러 가지 경로들을 나타낸 것이며 LMR을 산정하는 과정을 나타낸 것이며 (b)는 점P에서 발생한 가스가 배기구로 나가는 경로들을 역추적한 경로들을 나타낸 것으로, 가상의 LMA를 산정하는 과정을 나타낸다. 이 때 (a)와 (b)에서 가스 유동의 출발점과 도착점은 같으며 가스의 유동 경로 또한 동일하기 때문에 (a)의 LMR과 (b)의 가상의 LMA는 동일한 값을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 Fluent의 UDF 기능을 이용하여 (a)와 같이 시뮬레이션을 통하여 시설 내부에 형성된 유동장의 방향을 강제적으로 역전시킴으로써 (b)와 같은 유동장을 형성시켰다. 그 결과 Passive scalar Transport equation을 통하여 가상의 LMA값을 산정하였고, 이를 LMR값으로 대치하였다.

본 연구에서 제시된 LMR 값 산정법은 LMR 값을 산정하고자 하는 모든 측정마다 실험을 독립적으로 실행하여야 하며 이에 따라 실험의 시행 횟수가 필연적으로 많은 기존의 추적가스를 이용한 현장실험 방법에 비하여 많은 시간과 노력을 절약할 수 있는 방법이다. 또한 추적가스법을 기반으로 전산유체역학을 이용하여 LMR 값을 산정한 방법과 비교하였을 때, 추적가스의 유동을 모의할 필요가 없기 때문에 연산에 필요한 방정식의 수가 적고 이에 따라 연산의 편의성과 시간의 측면에서 많은 개선점을 갖는

방식이다. 이와 같은 LMA와 LMR 산정 과정을 흐름도로 정리하면 Fig. 4와 같다.



(a) The concept of pathway to compute the value of LMR



(b) The technically backtracking concept of pathway to compute the value of hypothetical LMA

Fig. 3 The concepts of estimating LMR values using hypothetical LMA values

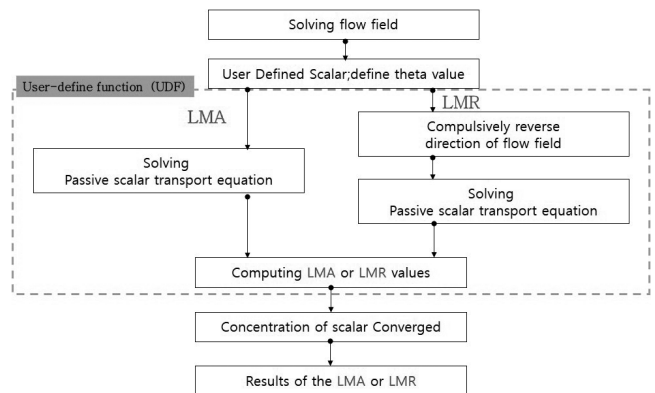
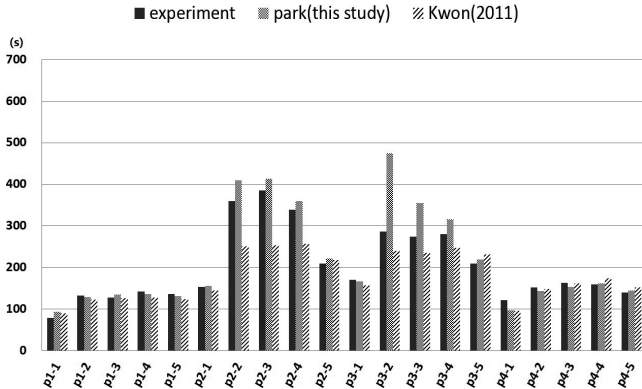


Fig. 4 The flow chart designed for calculation of age-of-air values

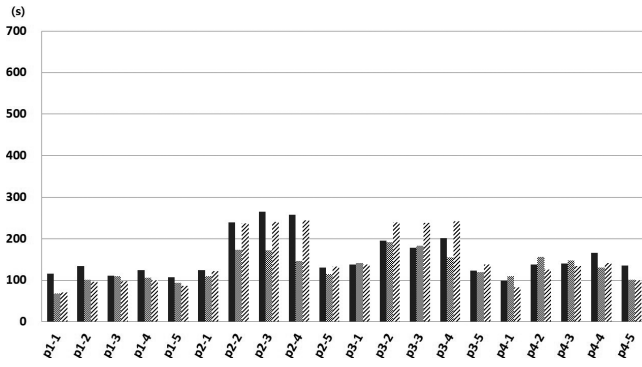
III. 결과 및 고찰

CFD 시뮬레이션 연산을 이용한 Passive Scalar Transport Equation을 해석한 결과 각 Case 별 각각의 모든 측정점에서 LMA 값과 LMR 값을 산정할 수 있었다. 이를 통하여 기존의 선행되었

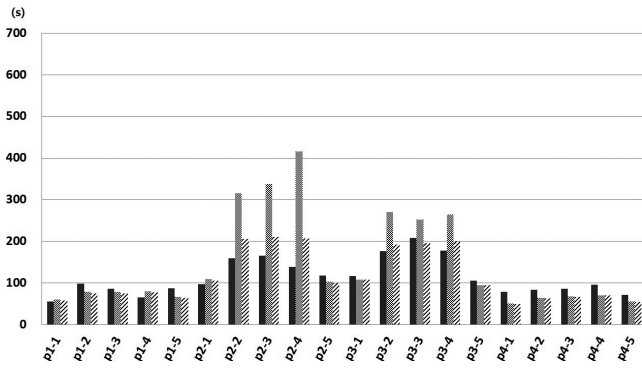
던 추적가스법을 이용한 현장실험과 CFD 시뮬레이션을 이용한 추적 가스의 흐름을 모의함으로써 공기연령 값을 산정한 Kwon et al. (2011)의 연구결과와 비교할 수 있었으며, 이를 바탕으로 본 연구에서 제시한 Passive Scalar Transport Equation의 풀이를 통한 공기연령 값 산정법의 타당성에 대한 검증을 실시하였다.



(a) The results of calculation LMA values at case 1



(b) The results of calculation LMA values at case 2



(c) The results of calculation LMA values at case 3

Fig. 5 Comparison of LMA values according to estimating methods among lab experiment using tracer gas method, CFD simulation using tracer gas method (Kwon et al., 2011) and CFD simulation using PSTE

1. LMA 값 산정

LMA 값 산정은 Passive Scalar Transport Equation의 해석을 통해 이루어졌다. 이를 위해 Kwon et al. (2011)의 연구에서 진행된 바와 같은 대상구조와 난류모델과 온도, 그 외의 경계조건을 같게 한 후 유동장을 형성하였다. 그 후 Fluent의 UDS 기능을 이용하여 Passive Scalar Transport Equation의 ϕ 을 유동장 내에서 해석 가능한 스칼라 값으로 정의했다. 다음으로 최종적인 ϕ 값을 구하기 위하여 앞서 연산된 유동장을 정상상태로 유지하며 Passive Scalar Transport Equation만을 해석하였다. 산정된 LMA 값은 Kwon et al. (2011)의 연구 결과와 비교되었으며 그 결과 각 Case에서 각 측정마다의 LMA 값은 Fig. 5와 같다. 또한 그래프와 같은 정성적 비교분석뿐만 아니라 정량적인 비

Table 3 Average error of LMA values between lab experiment and CFD simulation (Exp means the values of LMA from lab experiment (Kwon et al., 2011), Kwon means the values of LMA from simulation results (Kwon et al., 2011) and Park means the values of LMA from this study)

| | Exp vs. Kwon (2011) (%) | Exp vs. Park (%) |
|--------|-------------------------|------------------|
| Case 1 | 12.14 | 11.02 |
| Case 2 | 14.65 | 16.65 |
| Case 3 | 19.94 | 39.24 |

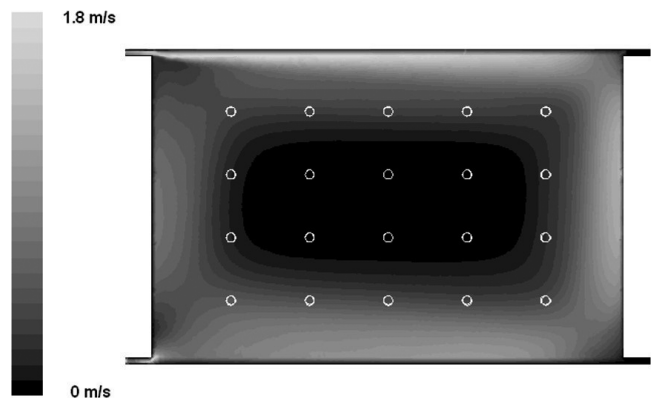


Fig. 6 Computed velocity-magnitude fields from CFD simulation in Case 3

교분석을 위하여 추적가스법을 이용한 실험을 통해 산정된 LMA 값과 시뮬레이션을 통해 산정된 LMA 값을 단순오차로 비교하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3에 나타난 바와 같이 기존의 추적가스를 이용한 현장 실험의 한계점을 보완하기 위해 연구된 전산유체역학 시뮬레이션을 통해 LMA 값을 산정한 방법 (Kwon et al., 2011)의 오차율과 본 연구에서 제시한 Passive Scalar Transport Equation의 해석을 통한 LMA 값 산정법의 오차율은 Case 1과 Case 2의 경우 비슷한 정도를 보였다. 이는 본 연구에서 제시된 LMA 값 산정법이 기존의 LMA 값 산정법과 비교해 보았을 때 어느 정도 타당한 정확성을 갖는다고 해석될 수 있다. 그러나 LMA 산정 case 3의 경우와 같이 다소 큰 오차율 보이는 이유는 Fig. 5의 (c)에서 P2-2, P2-3, P2-4와 같은 측정에서 큰 오차의 공기 연령 산정 결과를 나타냈기 때문이다. 이는 대상 공간 전체의 유속 분포도를 나타내는 Fig. 6을 참고하였을 때 대상 공간의 입구에서 분사된 유속의 흐름이 벽면을 따라 주 기류를 형성하기 때문에 대상 공간의 내부에 위치한 P2-2, P2-3, P2-4와 같은 측정점은 극심한 정체구간에 속하게 된다. 따라서 시간항으로 표현되는 공기연령의 값은 매우 크게 산정되며 이는 큰 오차로 이어지게 된다. 그러나 Fig. 5의 세 그래프를 정성적으로 분석하였을 때 그래프에 제시된 세 가지 LMA 값 산정 방법 별로 측정 간에 환기가 잘 되는 구간과 잘 되지 않는 구간을 나타내는 경향을 같음을 알 수 있다. 즉, 추적가스법을 이용한 실험을 통해 산정된 LMA 그래프에서 정체구간을 의미하는 LMA 값이 큰 측정점은 동일 Case에서 본 연구에서 제시된 방법으로 LMA 값이 산정되었을 때에도 상대적으로 큰 LMA 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시된 LMA 값 산정법은 오차율과는 독립적으로 정체구간과 비정체구간을 나타내는 측면에선 용의하다고 할 수 있다.

2. LMR 값 산정

LMR 값 산정은 LMA 값 산정법과 마찬가지로 본 연구의 대상 구조에 유동장을 형성한 후 Fluent 프로그램에 c언어를 기반으로 한 UDF기능을 적용하여 이루어졌다. UDF 적용 결과 대상 구조에 형성된 유동장을 나타내는 벡터장이 강제적으로 정반대의 방향을 갖게 됨으로써 Passive Scalar Transport Equation의 해석을 통하여 가상의 LMA 값을 산정하였고 이를 LMR 값으로 정의하였다. 그 결과는 Fig. 7의 세 가지 그래프와 같으며, LMA의 결과와 마찬가지로 추적가스법을 이용한 현장 실험으로부터 산정한 LMR 값과의 단순오차율을 계산하였다.

Table 4를 참고할 때 Case 3의 경우 Kwon et al. (2011)의 LMR 값 산정법의 오차율과 본 논문에서 제시한 LMR 값 산정법

의 오차율은 비슷한 수치를 보이며 Case 2의 경우 오히려 본 논문에서 제시된 LMR 값 산정법이 Kwon et al. (2011)의 LMR 값 산정법의 오차율보다 더 작은 오차율을 보인다. 이 결과는 LMA 값 산정 결과와 마찬가지로 본 연구에서 제시된 LMR 값 산정법이 기존의 LMR 값 산정법과 비교해 보았을 때 어느 정도

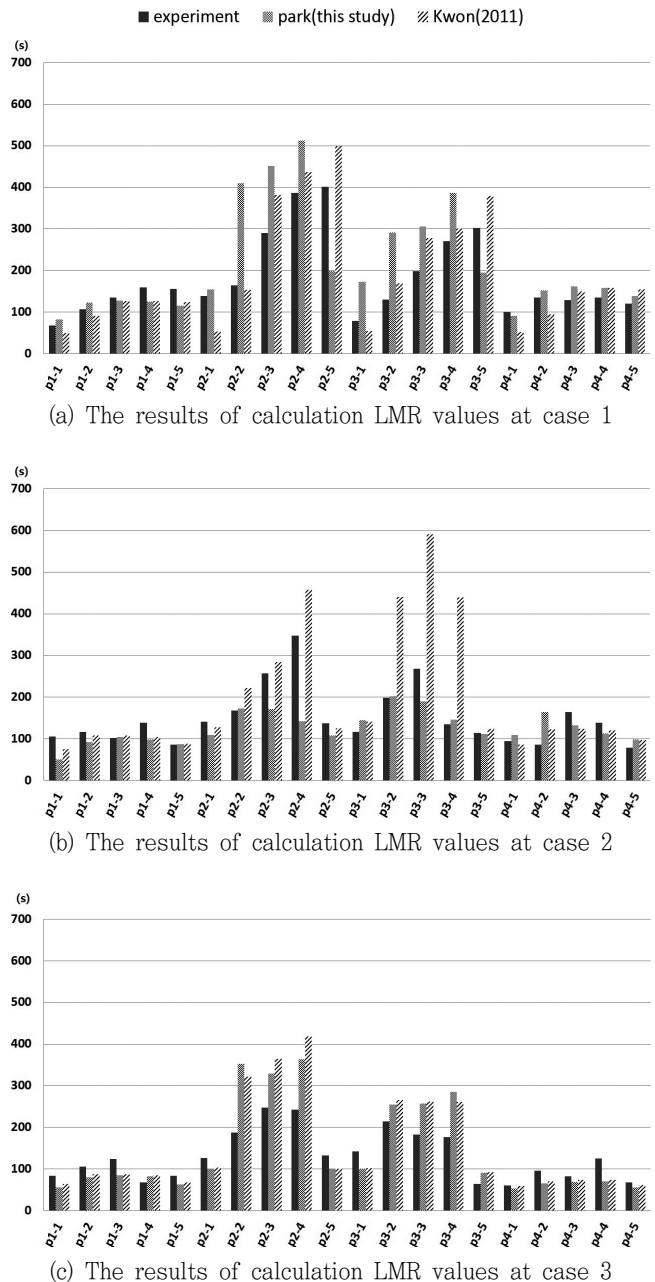


Fig. 7 Comparison of LMR values according to estimating methods among lab experiment using tracer gas method, CFD simulation using tracer gas method (Kwon et al., 2011) and CFD simulation using PSTE

Table 4 Average error of LMR values between lab experiment and CFD simulation (Exp means the values of LMR from lab experiment (Kwon et al., 2011), Kwon means the values of LMR from simulation results (Kwon et al., 2011) and Park means the values of LMR from this study)

| | Exp vs. Kwon (2011) (%) | Exp vs. Park (%) |
|--------|-------------------------|------------------|
| Case 1 | 25.32 | 42.30 |
| Case 2 | 38.28 | 23.93 |
| Case 3 | 31.30 | 33.35 |

타당한 정확성을 갖는다고 할 수 있다. 그러나 Case 1의 경우 기존의 LMR 값 산정법보다 약 1.7배의 오차율을 보이는 등 낮은 정확성을 갖는다.

LMR 값의 산정 결과의 정성적 분석의 경우 LMA 값의 산정 결과와 마찬가지로 각 Case별로 각 측정 간에 환기가 잘 되는 구간과 잘 되지 않는 구간을 나타내는 경향은 전반적으로 시물레이션 결과와 추적가스법을 이용한 현장 실험 결과가 유사한 경향을 알 수 있었다.

한편, LMR 값 산정 결과의 경우 그 오차가 전반적으로 LMA 값의 오차보다 큰 경향을 보인다. 이는 Kwon et al. (2011)의 시물레이션 결과와 본 연구의 시물레이션 결과 모두에 해당하는 상황으로 비추어보았을 때 Kwon et al. (2011)의 연구에서 실행된 LMR 값 측정을 위한 추적가스법을 이용한 현장 실험과정상의 실험적 한계를 고려해 볼 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 LMR 값 산정을 위하여 최소 한 번의 실험이 시행되어야 하기 때문에 본 연구의 LMR 측정 수가 총 20개 인 것을 고려하면 이에 따른 현장 실험은 최소 20번 이상 시행되어야 한다. 그러나 이러한 다수의 반복 실험에 있어서 실험의 초기 조건을 모두 동일하게 설정하는 것은 현실적으로 많은 어려움이 따른다. 따라서 전산유체역학 시물레이션을 이용한 LMR 값 산정 결과는 추적가스법을 이용한 현장실험의 결과인 LMR 값은 큰 오차를 가짐을 유추할 수 있다.

3. 현장 실험과 시물레이션 결과의 오차 원인 가능성

LMA와 LMR 값 산정 결과 본 연구에서 제시된 유동 방정식의 해석을 통한 공기연령 산정법은 정성적으로 정체구간과 비정체 구간을 나타내기에 적절한 결과를 나타내었다. 그러나 정량적으로 단순오차율을 산정하였을 때 40 % 정도의 높은 오차율을 보이는 Case가 존재하였으며 LMR 값의 경우 전체적으로 2배 이상의 높은 오차율을 나타냈다. 본 연구에서 제시한 공기연령 산정법의 정확성 및 신뢰성을 높이기 위해 이러한 오차들의 원인 가능성을 분석해 본 결과 다음과 같다.

첫째, 앞서 LMR 값 결과 분석에서 언급하였던 현장 실험 과정 중 발생할 수 있는 오차이다. 본 연구에서 20개의 LMR 값이 측정되었기 때문에 LMR 측정 실험의 경우 각각 독립적으로 총 20번 이상의 실험이 시행되어야 하며 각 실험 당 가스발생의 과정이 필수적이다. 추적가스는 비가시적이며 무형적이기 때문에 공기연령 값을 산정하는 대상 구조에 남아있는 추적가스의 농도를 정확히 파악하기 어려우며 이는 다수의 실험에 있어서 동일한 초기 실험 조건을 설정하는데 큰 어려움으로 작용하였을 것이다.

둘째 오차의 원인으로는 매우 작은 유속을 갖는 정체구간이다. 단순오차율의 계산 시 몇몇의 매우 큰 오차들이 존재 할 경우 전체 오차율 또한 다소 높게 산정된다. 이와 같은 점을 고려하였을 때, Fig. 5와 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 몇몇의 측정점에서 매우 큰 오차를 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 이와 같은 측정점들의 유속 값을 분석하였을 때 0.01 m/s 정도의 매우 작은 유속 값을 가졌다. 이는 현장 실험과 시물레이션상 0.01 m/s의 작은 유속 차이를 보일 지라도 유속의 차이는 두 배 이상의 차이를 보이게 되며 이는 시간항으로 표현되는 공기연령 값의 큰 오차로 이어질 수 있다.

실제로 Case 3의 LMR 값의 경우 유속이 0.01 m/s 근처의 값을 갖는 측정점들인 P2-2, P2-3, P2-4 등에서의 LMR 값을 제외하여 단순오차율을 계산한 결과 약 25 %의 오차율의 감소를 보였다.

마지막으로 매우 작은 유속에서의 난류모델의 적용성에 의한 오차가 있다. 본 연구에서 적용된 난류모델은 Standard $k-\epsilon$ model로 RANS (Reynold Averaged Navier Stokes) 모델에 속한다. RANS 모델은 작은 강도의 난류는 Navier-Stokes equation을 해석하기 위하여 무시되거나 평균값으로 가정된다. 이는 실제의 난류를 포함한 유체의 유동과는 다른 해석 결과를 초래할 수 있기 때문에 작은 유속을 갖는 대상공간을 해석할 때에는 한계점을 갖는 난류모델이다. 따라서 본 연구와 같이 매우 작은 유속을 갖는 정체 구간이 존재하는 대상 공간의 경우 RANS 모델의 적용성은 떨어지게 된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 전산유체역학을 이용하여 유체의 유동 방정식을 해석하였고 이를 통하여 경제적이고 효율적인 공기연령 방법을 제시하고자 하였다. 그 결과 기존의 추적가스법을 이용한 공기연령 산정 과정에서 한계점으로 지적되었던 비가시적인 가스 제어의 어려움, 현장 실험 중 발생할 수 있는 오차 등의 한계점들을 극복할 수 있었으며, 무엇보다 전산유체역학을 이용하여 추적가스의 흐름의 모의를 통한 공기연령 산정법 (Kwon et al., 2011)에 비하여 적은 컴퓨터 메모리와 계산시간의 큰 감소를 이

루었다. 특히 LMR 값 산정의 경우 시뮬레이션 연산시간의 90 % 이상 감소를 이룰 수 있었다. 그러나 Kwon et al. (2011)의 경우 산정하고자 하는 LMR 값 개수에 따라서 시뮬레이션 연산 횟수가 늘어나는 반면 본 연구의 방법의 경우 산정하고자 하는 LMR 값 개수와 무관하게 한 번의 시뮬레이션 연산만으로 모든 영역에 대한 LMR 값을 도출할 수 있기 때문에 다수의 LMR 값의 연산의 경우 연산시간은 더욱 큰 차이를 보일 것으로 판단된다.

Kwon et al. (2011)의 연구에 이용된 공기연령 산정법과 본 연구에서 제시된 공기연령 산정법을 비교하였을 때 몇몇 Case를 제외한 경우 비슷한 수준의 오차를 보였다. 한편 일부 큰 오차를 보인 원인으로는 추적가스를 이용한 현장실험과정 발생할 수 있는 오차와 수많은 실험으로 인한 오차 등이 사료되었으며, 매우 작은 유속을 갖는 정체구간에서의 문제점 및 난류모델의 부적합성으로 분석되었다. 따라서 향후 유속이 작은 정체구간을 포함하는 공간 해석에 타당한 난류모델의 적용과 같은 후속 연구를 통하여 본 연구에서 제시된 공기연령 산정법의 정확도가 개선된다면 농업시설의 환기효율을 경제적이고 효율적으로 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ007823 2013)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. Bartak, M., M. Cermak, J. A. Clarke, J. Denev, F. Drkal, M. Lain, I. A. Macdonald, M. Majer, and P. Stankov, 2001. Experimental and Numerical Study of Local Mean Age of Air. *In Proc. 7th International Building Performance Simulation Association Conference, IBPSA*. ISBN 85-901939-3-4.
2. Bot, G. P. A., 1983. Greenhouse Climate: From Physical Processes to a Dynamic Model. Ph.D dissertation. Wageningen, Netherlands: Wageningen Agricultural University.
3. Boulard, T., A. Baille, and B. Draoui, 1993. Greenhouse Natural Ventilation Measurements and Modeling. International Workshop on Cooling Systems for Greenhouse, Tel Aviv, AGRIPPECH 05-02/03.
4. Boulard, T. and B. Draoui, 1995. Natural Ventilation of a Greenhouse with Continuous Roof Vents: Measurements and Data Analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research* 61: 27-36.
5. Boulard, T., J. F., Meneses, M. Mermier, and G. Papadakis, 1996. The Mechanisms Involved in the Natural Ventilation of Greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology* 79: 61-77.
6. Chalabi, Z. S. and B. J. Bailey, 1989. Simulation of the Energy Balance in a Greenhouse. AFRC Institute of Engineering Research. Division Note, DN. 1516, 17.
7. Cheon, M. J., 2007. A Study on Ventilation Possibility of Passive Ventilation Window(vent-window) System in an Apartment House. Thes., Yonsei University: Architectural Engineering.
8. Choi, K. S., 2000. The Evaluation of the Performance for Door Air Quality in High-rise Apartment with Central HVAC System. Thes, Hanyang University: Architectural Engineering.
9. De Jong, T., 1990. Natural Ventilation of Large Multi-span Greenhouse. pH. D dissertation, Wageningen, Netherlands: Wageningen Agricultural University.
10. Fernandez, J. E. and B. J. Bailey, 1992. Measurement and Prediction of Greenhouse Ventilation Rates. *Agricultural and Forest Meteorology* 58: 229-245.
11. Han, H. T., 1999. On the Definition of Ventilation Effectiveness. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering* 28(1): 38-47.
12. 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 Greenhouses in Korea. *Transactions of the ASABE* 51(5): 1417-1432.
13. Jang, J. S., K. C. Noh, and M. D. Oh, 2005. Study on the Relationship between Indoor CO₂ Concentration and Local Mean Air - Age in the Lecture Room with System Air - Conditioner and Ventilation Unit for Cooling Loads. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering* 17(8): 736-746.
14. Kittas, C., T. Boulard, M. Mermier, and G. Papadakis, 1996. Wind Induced Air Exchange Rates in a Greenhouse Tunnel with Continuous Side Opening. *Journal of Agricultural Engineering Research* 65: 378-449.
15. Kozai, T. S. Sase, and M. Nara, 1980. A Modeling Approach to Greenhouse Environmental Control by

- Ventilation. *Acta Hort* 106: 125-136.
16. Kwon, K. S., I. B. Lee, H. T. Han, C. Y. Shin, H. S. Hwang, S. W. Hong, J. P. 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): 421-433.
 17. Shin, C. Y., H. T. Han, I. B. Lee, and K. S. Kwon, 2010. Experimental Study for Contribution of each Inlet in a Livestock with Multiple Inlets. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering* 2010(6): 473-478.
 18. Lawrence, W. J. C. and R. M. Whittle, 1960. The Climatology of Glasshouses II. Ventilation. *Journal of Agricultural Engineering Research* 5: 36-41.
 19. Lee, J. H., 2004. Humidity Environment and Crop Growth in Greenhouse. *Journal of Bio-Environment control* 17(2): 12-12.
 20. Morris, L. G. and F. E. Neale, 1954. The Infra-red Carbon Dioxide Gas Analyser and Its Use in Glasshouse Research. National Institute of Agricultural Engineering. Tech. Memo. No. 99, Silsoe, 13.
 21. Nederhoff, E. M., 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: 309-319.
 22. Noh, K. C., C. W. Han, and M. D. Oh, 2006. Effect of the Airflow Rate of the Ceiling-type Air-conditioner on Indoor Air Quality in the Lecture Room with Ventilation System. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering* 2006(11): 109-113.
 23. Okada, M. and T. Takakura, 1973. Guide and Data for Greenhouse Air Conditioning. 3. Heat Loss due to Air Infiltration of Heated Greenhouses. *Journal of Agricultural Meteorology* 28(4): 223-230.
 24. Papadakis, G., M. Mernier, F. J. Meneses, and T. Boulard, 1996. Measurement and Analysis of Air Exchange Rates in a Greenhouse with Continuous Roof and Side Openings. *Journal of Agricultural Engineering Research* 63: 219-227.
 25. Seo, I. H., I. B. Lee, S. W. Hong, H. S. Hwang, B. 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. *Korean Society of Agricultural Engineers* 50(1): 25-37.
 26. Zhaung, W., H. Per, and S. Jakob, 2002. Modeling and Control of Livestock Ventilation Systems and Indoor Environments. *AIVC 26th Conference* 335-340.