

축사 주변의 악취 및 부유분진의 CALPUFF 모델링: 계사 중심으로

임광희^{*,**,*†}

*대구대학교 화학공학과
38453 경상북도 경산시 진량읍 대구대로 201
**산업 및 환경폐가스연구소
38453 경상북도 경산시 진량읍 대구대로 201
(2018년 12월 10일 접수, 2018년 12월 25일 수정본 접수, 2018년 12월 29일 채택)

CALPUFF Modeling of Odor/suspended Particulate in the Vicinity of Poultry Farms

Kwang-Hee Lim^{*,**,*†}

^{*}Department of Chemical Engineering, Daegu University, 201, Daegudae-ro, Gyeongsan, Gyeongbuk, 38453, Korea

^{**}Laboratory of industrial and environmental waste air, Daegu University,
201, Daegudae-ro, Gyeongsan, Gyeongbuk, 38453, Korea

(Received 10 December 2018; Received in revised form 25 December 2018; accepted 29 December 2018)

요 약

본 연구에서는 시간별 실제 기상데이터를 토대로 한 CALPUFF 모델링 수행을 통하여 민원지역에 대한 신뢰성이 있는 모델링 결과를 도출하였다. 무창형 계사 P1 및 P2의 방진망 구조물(chamber) 및 개방형 계사 P3로부터의 오염원 배출 및 확산거동을, 부피오염원으로서의 CALPUFF 모델링 또는 각 방향의 배출면적을 가중치로 한 수직 배기의 평균 선속도인 모델 배출 선속도(u_z^M)를 적용한 점오염원으로서의 최종 CALPUFF 모델링으로 구현하였다. 또한 계사 P1, P2 및 P3에서의 배출되는 악취 및 분진오염원 배출량에 대한 각각의 제거효율(0, 20, 50 및 80%) 또는 각각 대응되는 emission rate (100, 80, 50 및 20%)에 따른 시나리오를 기본으로, CALPUFF 모델링을 수행하여 각각에 대한 민원지역의 농도예측을 수행하였다. 이러한 민원지역에 대한 암모니아, 황화수소, $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 에 대한 농도예측과 악취방지법 및 대기환경법에서 요구되는 오염물질 농도와 비교하여, 계사 P1, P2 및 P3에 요구되는 암모니아, 황화수소, $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 에 대한 제거율을 산정하였다. 그 결과로서, “P1, P2 및 P3에서 각각의 배출농도를 줄인 비율만큼 각각의 discrete receptor에서의 농도가 같은 비율로 감소한다”는 가정(a priori assumption)이 본 CALPUFF 모델링 범위 내에서 적용 가능성이 입증되었다. 한편 부피오염원을 적용한 CALPUFF 모델링을 수행한 경우에서 방지시설의 요구되는 제거효율은, 점오염원을 적용한 CALPUFF 모델링을 수행한 경우와 비교하였을 때에 P1의 경우에는 상호간에 유사하였으나, P2와 P3에서 암모니아와 PM_{10} 의 경우에 더 높게 나타났다. 그럼에도 불구하고 민원해결을 위한 안전한 접근 방법으로서 부피오염원으로서 CALPUFF 모델링을 선정하였다. 이에 따라서 본 연구에서는 암모니아, 황화수소, $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} 와 같은 오염원배출에 대하여 무창형 계사 P1 및 P2에 요구되는 정량적 방지수준을 타당하게 도출하였다.

Abstract – In this study, CALPUFF modeling was performed, using a real surface and upper air meteorological data to predict trustworthy modeling-results. Pollutant-releases from windscreen chambers of enclosed poultry farms, P1 and P2, and from an open poultry farm, P3, and their diffusing behavior were modeled by CALPUFF modeling with volume sources as well as by finally-adjusted CALPUFF modeling where a linear velocity of upward-exit gas averaged with the weight of each directional-emitting area was applied as a model-linear velocity (u_z^M) at a stack, with point sources. In addition, based upon the scenario of poultry farm-releasing odor and particulate matter (PM) removal efficiencies of 0, 20, 50 and 80% or their corresponding emission rates of 100, 80, 50 and 20%, respectively, CALPUFF modeling was performed and concentrations of odor and PM were predicted at the region as a discrete receptor where civil complaints had been frequently filed. The predicted concentrations of ammonia, hydrogen sulfide, $PM_{2.5}$ and PM_{10} were compared with those required to meet according to the offensive odor control law or the atmospheric environmental law. Subse-

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: khlim@daegu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

quently their required removal efficiencies at poultry farms of P1, P2 and P3 were estimated. As a result, *a priori* assumption that pollutant concentrations at their discrete receptors are reduced by the same fraction as pollutant concentrations at P1, P2 and P3 as volume source or point source, were controlled and reduced, was proven applicable in this study. In case of volume source-adopted CALPUFF modeling, its required removal efficiencies of P1 compared with those of point source-adopted CALPUFF modeling, were predicted similar each other. However, In case of volume source-adopted CALPUFF modeling, its required removal efficiencies of both ammonia and PM₁₀ at not only P2 but also P3 were predicted higher than those of point source-adopted CALPUFF modeling. Nonetheless, the volume source-adopted CALPUFF modeling was preferred as a safe approach to resolve civil complaints. Accordingly, the required degrees of pollution prevention against ammonia, hydrogen sulfide, PM_{2.5} and PM₁₀ at P1 and P2, were estimated in a proper manner.

Key words: CALPUFF modeling, Odor, PM_{2.5}, PM₁₀, Poultry farm, Volume source, Point source

1. 서 론

불규칙하고 간헐적인 발생특성을 가진 악취의 발생빈도가 민원 발생의 주요원인이고, 악취규제의 목적은 주로 민원 등의 불만을 야기 시키지 않는 것임을 고려하여 악취발생원 중심의 국지적인 관리가 필요하다. 따라서 악취측정과 배출허용기준을 포함한 악취배출에 대하여 여러 나라에서 입법되고 있으며[1-4], 우리나라에서도 2005년부터 악취방지법이 시행되고 있다. 그럼에도 불구하고, 축산 농가의 사육형태가 집약적이고 기업화됨에 따라서, 축사 및 가축분뇨처리에서 발생하는 악취에 따른 민원이 자주 발생하여 사회적으로 문제가 제기되고 있다. 축산시설 중에서 닭 사육시설인 계사 및 계분퇴비에서 배출되는 악취는 일반적인 산업시설 또는 생활시설에서 배출되는 악취보다 악취의 농도, 강도 및 불쾌도 측면에서 더욱 크다고 보고되고 있다[5,6]. Ramiro과 Danny[7]는 mushroom 퇴비의 재료로서 사용되는 계분으로부터 미생물활성에 의하여 발생하는 암모니아의 농도는 너무 높아서 인간 및 동물 모두에게 위해하다고 보고하였다. Kim과 Choi[8]는 계분을 퇴비원료로 사용하는 호기성발효에 있어서 악취성분 발생량에 대하여, 암모니아와 아민류가 373.9 ppm이고 황화수소의 발생량은 0.3~2.92 ppm으로 조사하였다. Kazutaka *et al.*[9]는 계분을 퇴비원료로 사용할 경우 암모니아 발생농도가 최고 2,500 ppm이라고 보고하였다. 이와 같이 암모니아는 질소비료 생산, 농업, 목축업 특히 양계장에서 배출되는 주요 악취원으로서 고농도의 암모니아에 노출된 농업종사자들이 산업재해로서 여러 가지 호흡기질병에 시달린다고 보고되고 있다[10].

따라서 대기환경적 측면에서 계사 주변의 주민들의 악취에 대한 민원을 해결하기 위한 계사와 주민거주지역의 적정이격거리 도출 및 설정을 위하여, 외국에서는 악취확산모델에 적용될 계사의 악취 발생 주요 원인물질인 암모니아와/또는 황화수소 및 분진의 배출계수(emission factor) 산정을 위한 조사와 연구[11-18] 및 평가[19]가 이미 20 여 년 전부터 최근까지 수행되었다. Roumeliotis과 Heyst[11]은 계사의 주변 환경에 대한 영향평가를 위하여 여러 조사 및 연구로부터 계사로부터 배출되는 암모니아 및 크기별 분진(particulate matter, PM)의 배출계수를 보고하였다. Navaratnasamy와 Feddes[12]는 육계와 산란계의 마리(수) 당 암모니아 배출계수를 각각 50 및 15 mg/h로 산정하였다. Lacey 등[13]은 터널식 배기형 육계사에서 배출되는 암모니아 및 분진(PM₁₀)의 배출계수를 각각 632 및 26 mg/bird/day로 보고하였다. Lim 등[14]은 산란계사로의 분진(Total suspended particles, TSP; PM₁₀; PM_{2.5}) 농도와 배출량을 조사하여 배출계수를 산정하였다. Gay 등[15]은 축사 및 축분에서 배출되는 악취, 총 환원황(total reduced sulfur) 및 암모니아를 정량화하였는데, 돈사 및 돈분에서 나오는 악취, 총 환원황 및 암모니아의 배출

량이 가장 컸고 돈사에서 총 환원황과 악취 및 암모니아와 악취의 상관관계가 각각 $r=0.947$ 및 0.954 로서 매우 크다고 보고하였다. Hadlocon 등[19]은 계사 설비로부터 주변으로 PM_{2.5}와 PM₁₀의 확산에 대한 영향평가로서 AERMOD 모델링을 수행하였다. 한편 국내에서는 비교적 근래에 계사에서 발생하는 암모니아와 황화수소의 배출계수 산정을 위한 연구가 수행하여 보고되었다([20]). 또한 Kim 등[21]은 우리나라의 계사 유형별 및 월별로 현행 악취방지법 상의 규제물질 22종의 계사 내 농도분포를 조사하였다. 그 결과로서 계사 유형 및 측정시점에 관계없이 암모니아가 ppm 수준으로 가장 높았다. 다음으로 황계열 물질 중에서는 황화수소, 휘발성유기화합물 중에서는 methyl ethyl ketone, 지방산류 중에서는 propionic acid와 butyric acid가 백단위 수준의 ppb로 측정되었고, 나머지는 십단위 ppb로 측정되었고, 22종의 규제물질 중에서 알데히드류 5종은 검출되지 않았다고 보고하였다. 계사의 추가적인 악취발생을 야기하는 원인물질로서 p-cresol, skatole 또는 indole 등의 페놀계열 물질[22, 23]도 보고되었다. 그러나 현행 악취방지법에서는 규제대상으로 설정되어 있지 않기 때문에, 전술한 페놀계열 물질을 본 연구에서의 악취 관련 주 대상물질에서는 제외하였다.

배출원과 수용체(receptor)의 적합한 시간 및 공간적 관계설정 은 오염저감 조치를 위해서 어느 배출원이 개선목표가 되어야 하는지에 대한 이해를 가능하게 한다[24]. 한편 수많은 공기확산모델들이 개발되었고, 개발된 Gaussian 모델(e.g., CALINE4 및 AERMOD), Lagrangian/Eulerian 모델(e.g., GRAL, CALPUFF 및 TAPM) 및 computational fluid dynamics (CFD) 모델들(e.g., ARIA Local 및 MICRO-CALGRID)에 의한, 배출원에서 나온 오염원 이동을 산출하는 능력이 평가되었다[25, 26]. 그러나 이러한 CFD 모델들은 건물이나 도심구역 주변의 확산과 같은 복잡한 지형의 경우에는 특별하게 더욱 정확한 결과를 도출하여 주지만[27], CFD 모델의 입력 데이터와 연산적 요구가 너무 집약적이어서 자주 적용하거나 방대한 지역에 대한 적용은 어렵다. 그러나 CALPUFF 모델은 오염원 농도의 수직 및 수평적 분포에 대한 Gaussian 근사법(approximation)에 기반한 대수적 모델로서 비용효율성, 간편성 및 사용하는 편리성 때문에 통상적으로 사용되고 있다. CALPUFF 모델링은 현장조사보다 경제적인 방법임에도 불구하고, 일시적 배출의 경우에는 시공과 배출량에 관한 불확실성 때문에 신뢰할 수준으로 모델링하기 어렵다. 부연하면 오염원의 배출이 일시적 배출이 아니고 지속적인 경우에 CALPUFF 모델링을 신뢰할 수준으로 모델링 할 수 있다. 그러나 현장검사방법은 CALPUFF 모델링과 다르게 두 종류 이상의 악취가 존재할 경우에는 가장 불쾌한 악취가 보고되기 때문에 그 중에서 한 종류의 악취농도를 정확하게 특징지을 수 없다. 그럼에도 불구하고, Ranzato 등[28]은 도시고형폐기물을 처리하는 혐기소

화소에서 발생하는 후각적 악취문제를 현장검사방법과 CALPUFF 모델링으로 평가하였고 두가지 방법이 각각 악취를 합리적으로 평가한다고 보고하였다. 지금까지 CALPUFF 모델은 대부분 산업이나 도시의 대기오염원으로부터의 악취평가[28-32]에 주로 적용되었으나, 기사에서 배출되는 악취평가를 위한 CALPUFF 모델링에 대한 연구는 거의 없는 편이다.

본 논문인 본 연구의 part 1에서는 악취오염원을 배출하는 주요 점오염원인 성주군의 대규모 무창형 및 개방형 닭 사육시설과, 인근의 악취 및 분진으로 인한 민원이 빈번한 악취 및 분진의 수용(receptor) 지역의 상관관계를 CALPUFF 모델링을 통하여 도출하였다. 한편, 후속 연구인 part 2에서는 대규모 기사들과 민원 지역의 악취 및 분진의 현장농도 측정을 통하여 도출된 상관관계를 입증하였다. 이를 위하여, 본 논문에서는 기사 또는 계분퇴비에서 발생하는 현행 악취방지법 상의 규제물질 22종에서 주요 악취원인 암모니아와 황화수소, 및 대기환경법 상의 분진기준의 PM₁₀과 PM_{2.5}를 CALPUFF 모델링의 주 대상물질들로 하였다. 또한 이러한 악취원 및 분진을 확산물질들로 한 여러 가지 경우의 case study들을 통하여 최적의 CALPUFF 모델링을 수행하고 분석하였다.

2. 연구방법

2-1. CALPUFF 모델링

CALPUFF 모델은 미국 Environmental Protection Agency(EPA)의, 1978년도에 출판되고 최근에는 2017년도에 개정된 “Guideline on Air Quality Models”에서 선정된 비정상상태의 puff 모델에 기반하고, 실제 지표 및 고층 기상데이터를 입력하여 실제 기상상태와 연동되는 신뢰도가 높은 대기오염모델로서, CALPUFF 모델링 시스템은

Fig. 1과 같이 CALMET, CALPUFF 및 CALPOST의 세가지 주요 요소로 구성된다[33]. CALMET는 3차원 그리드 모델링영역에서 통상적으로 매 시간마다 바람장 및 온도장을 구성하는 기상모델이다. CALPUFF는 모델 배출원으로부터 배출되는 물질의 연기덩어리(puff)를 비정상상태에서 확산과정을 모사하면서 설명하는 전달 및 확산모델로서 Lagrangian Gaussian 퍼프 모델이다. CALPOST는 CALPUFF로부터의 파일을 처리하면서 모사결과를 처리하는데 사용된다[34]. 연기덩어리(puff)가 기여하는 악취수용(receptor) 지역의 지표농도는 다음 식 (1)과 같이 표현될 수 있다[33].

$$C_s = \frac{Q_p}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g \exp\left[-\frac{d_a^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{d_c^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (1)$$

where

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{1/2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(H_e + 2nh)^2}{2\sigma_x^2}\right]$$

한편 간편한 평균시간 스케일링계수(scaling factor)[35]는 악취인지 평가에 적용할 때에 단기 첨두농도를 산출하기 위하여 사용될 수 있다. 이러한 조정이 필요한 이유는 악취는 몇 초의 시간대에서 인지되지만 CALPUFF 모델링에서 평균농도를 계산하기 위하여 사용되는 농도확산곡선과 관련되는 평균시간은 3-60분(통상 60분)이기 때문이다. 이러한 조정은 그 시간 동안 평균 바람흐름에 대한 바람장 변동, 바람과 교차(cross-wind) 방향의 악취물질분포에 대한 영향을 처리한다. 악취모델링에서 더 짧은 평균시간을 사용하였을 때에는 바람에 교차(cross-wind) 방향인 측면 확산에서의 표준편차(σ_c) 또는 확산 폭이 감소하므로 연기덩어리(puff) 중심에서의 농도가 증가한다[33]. 이와 같이 악취모델링에서 측면 확산계수를 조정하는 평균시간 스

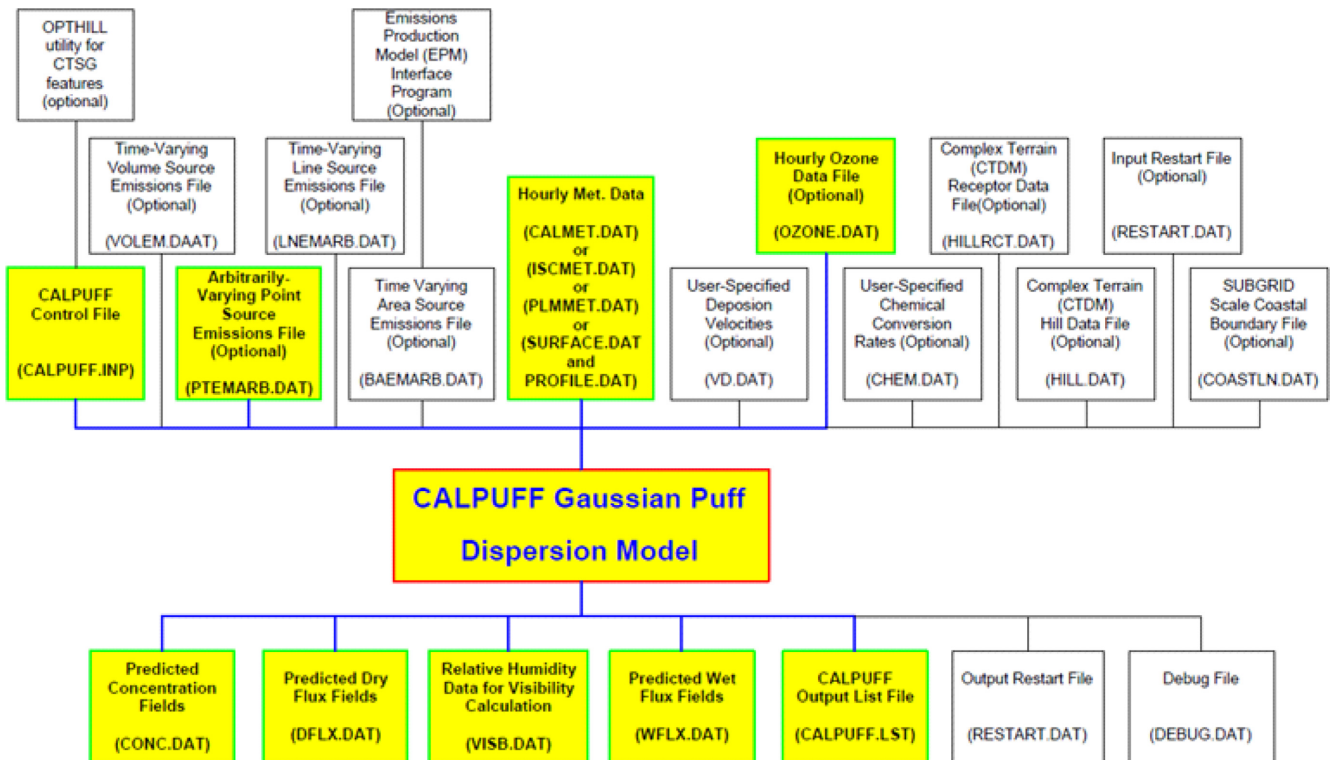


Fig. 1. Structure of CALPUFF modeling system.

Table 1. Location and scale of main poultry farms in the area of Seongju

No.	Area (m ²)	Type of poultry farm		Number of birds	UTM X	UTM Y
		Enclosed	Open			
P1	6,392	○		210,000	440,217.42	3,973,138.78
P2	3,921	○		180,000	436,718.23	3,966,691.61
P3	2,815		○	90,000	433,518.64	3,977,533.55

케일링계수(Scaling factor)[35]는 식 (2)와 같이 1/5th 지수법칙(power law)을 따른다[33].

$$f(t, t_0) = (t_0/t)^{0.2} \quad (2)$$

식 (2)와 같은 평균시간 스케일링계수(Scaling factor)는 모델링이 끝난 후에 CALPOST에서 직접 평균농도에 적용할 수 있다. 따라서 더 짧은 평균시간에서 농도는 증가하게 된다[33].

2-2. 연구방법 개요

2-2-1. 배출원 조사 및 CALPUFF 모델링을 위한 설계자료 구축
 악취 확산의 전산모사를 위한 설계자료를 구축하기 위하여 성주군의 대규모 무창 닭 사육시설에서의 오염원 배출원의 높이, 좌표, 배출량, 배기팬 등의 배출원 조사를 하였다. 구체적으로 Table 1과 같이 9만수 이상의 대규모 닭 사육장(계사)인 무창형 계사 P1과 P2 및 개방형 계사 P3들의 양식(type), 사육규모 및 위치를 조사하였다. 또한 성주군의 각 대규모 무창 닭 사육시설 점오염원들에서 주요 악취물질 및 분진의 배출량은 각각 참고문헌 [20] 및 [14]에 제시된 배출계수를 반영하여, 각각 Tables 2와 3과 같이 각 계사의 암모니아와 황화수소 및 분진 배출계수를 산정하여 설정하였다. 본 연구의 대상 지역인 성주지역의 대규모 계사로부터 악취 및 분진 배출에 따른 대기 모델은 CALPUFF 모델(Fig. 1)을 적용하였다. 본 CALPUFF 모델과 연동되는 실제 기상상태인 성주지역의 2016년도의 연간 및 계절별 바람장미는 Fig. 2와 같으며, Tables 4-7과 같은 CALPUFF 모델 적용조건을 적용하여서 바람장 분포의 모델예측을 하였다. CALPUFF 모델링을 위하여, 성주군의 계사들이 위치하는 지역으로서, 동서방향으로 30 km, 남북방향 30 km로 영역을 설정하였으며 격자간의 간격은 1 km로 하였고, 성주군의 악취 및 분진의 영향평가

Table 2. Determination of emission rates of ammonia and hydrogen sulfide from a poultry farm (unit: g/s)[20]

Odorous compound	Windowless farm	Open farm
Ammonia	$5633 \times \frac{\text{number of birds}}{3 \times 36 \times 10^7}$	$3931 \times \frac{\text{number of birds}}{3 \times 36 \times 10^7}$
Hydrogen sulfide	$68.52 \times \frac{\text{number of birds}}{3 \times 36 \times 10^7}$	$15 \times \frac{\text{number of birds}}{3 \times 36 \times 10^7}$

Table 3. Determination of emission rates of particulate matters from a poultry farm (unit: g/s)[14]

Particulate matters	Emission rate (g/s)
PM _{2.5}	$1.1 \times \frac{\text{number of birds}}{333.33} \times \frac{1}{86400}$
PM ₁₀	$16 \times \frac{\text{number of birds}}{333.33} \times \frac{1}{86400}$
TSP	$63 \times \frac{\text{number of birds}}{333.33} \times \frac{1}{86400}$

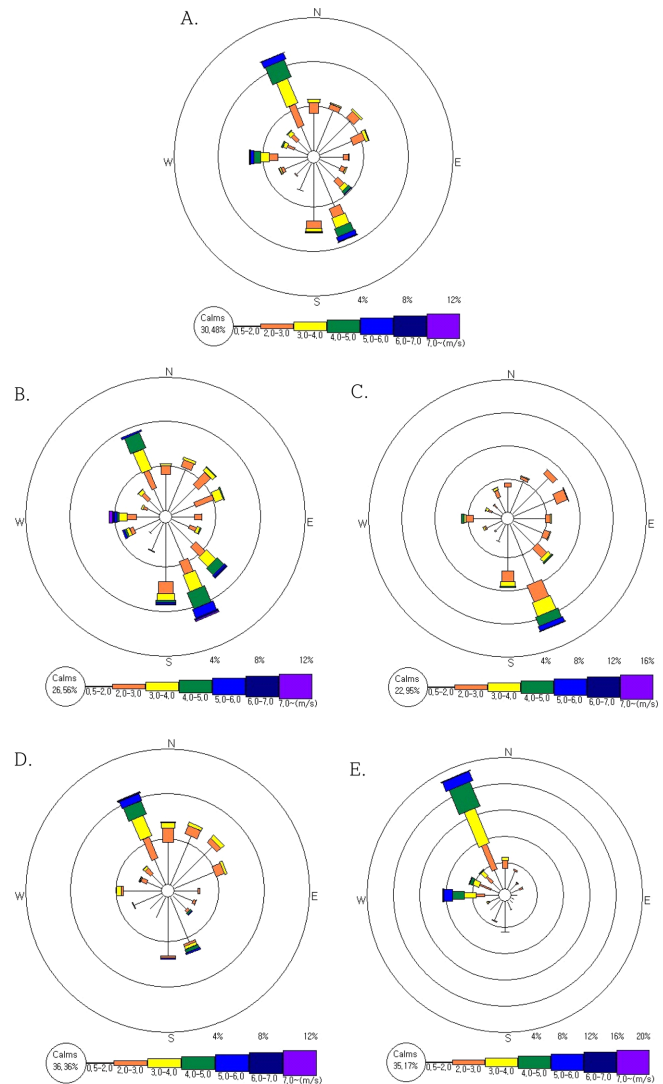


Fig. 2. Annual and seasonal wind rose diagram of Seongju in 2016: A. Annual; B. Spring; C. Summer; D. Fall; E. Winter.

모델링 대상 기간을 2016년 1월부터 12월까지로 하였다. 이에 따라서 성주지역의 대규모 계사로부터 악취 및 분진 배출에 따른 대기 모델링으로서 CALPUFF 모델링을 수행하였다. 또한 주요 계사 주변의 민원지역을 계사에서 배출되는 오염원의 수용체(receptor)로 간주하여 악취와 분진에 대한 CALPUFF 모델링을 수행하였다.

2-2-2. Case study: 부피오염원(volume source) 및 점오염원(point source)

대규모 무창형 계사에서는 주로 축벽배기를 수행하고, 무창형 계사의 배기를 수행하는 축벽은 Fig. 3과 같이 지면(ground)를 제외한

Table 4. Information of the model domain

Item	Description	
Grid origin (reference point)	X (Easting)	423,445.00 mE
	Y (Northing)	3,960,445.00 mN
Grid spacing (ΔX)	1 km	
Domain size	Nx(no. x grid Cells)	30
	Ny(no. y grid Cells)	30
No. of Vertical layers	10	
Cell face heights(m)	0,20,40,80,160,300,600,1000,1500,2200,3000	
Time zone	UTC+0900	
Projection	UTM (Unversal Transverse Mercator)	
UTM zone	52(northern)	
Modeling period	2016.01.05.1 am ~ 2016.12.29. 0 am	
Continent/Ocean	Asia	
Geoid-Ellipsoid	Korean Geodetic System 1995: WGS-84	
Region	South Korea	
Datum	WGS-84	

Table 5. Terrain input data

Item	File name	Description
Land cover map	causgs2_0la.img	(GLAZAS) USGS Global for Eurasia-Asia
Terrain height	N36E128.hgt	SRTM3 (~90 m)
Surface meteorological input data	143-2016.c14	CD144 Format
	279-2016.c14	
	810-2016.c14	
Upper air meteorological input data	47138-2016.tdt	TD6201 Format

5면체(i.e., front, rear, roof 및 2 sides)의 방진망 구조물로 연결되는데, 계사의 측벽으로부터 팬에 의하여 측벽배기된 악취 및 분진은 우선적으로 측벽면을 덮는 방진망 구조물의 rear(A=rear 면적)에 의하여 처리되고, 나머지 각 면에 수직 방향인 네 방향, 즉 방진망 구조물의 front(A=front 면적)에서 측벽의 수직방향, 방진망 구조물의 양 sides(B=side 면적)에서 측벽과 평행인 양 방향과, 방진망 구조물의 roof(C=roof 면적)에서 지면의 수직방향으로 각각 배출된다. 이와 같이 악취 및 분진이 네 방향으로 배출되는 무창형 계사는, 지면과 수직 또는 지면과 수평의, 하나의 배출구를 가지는 일반적인 점오염원과는 악취 및 분진의 배출형태가 다를 뿐 아니라 악취 및

Table 6. Surface meteorological input data

File	Station	Name	Station Number (ID)	UTM Coordinate		Time zone	Elevation Ht. (m)	Anemometer Ht. (m)
				X (km)	Y (km)			
143-2016.c14	Daegu	DG	143	465.400	3,971.076	UTC+0900 (-9)	58	10
279-2016.c14	Gumi	GM	279	438.510	3,998.953	UTC+0900 (-9)	48	10
810-2016.c14	Seongju	SJ	810	432.663	3,974.076	UTC+0900 (-9)	36	10

Modeling period : 2016.01.05.1 am ~ 2016.12.29. 0 am

Table 7. Upper air meteorological input data

File	Station	Name	Station Number (ID)	UTM Coordinate		Time zone	Elevation Ht. (m)
				X (km)	Y (km)		
47138-2016.tdt	Pohang	PH	47138	534.534	3,987.714	UTC+0900 (-9)	4

Modeling period : 2016.01.05.1 am ~ 2016.12.29. 0 am

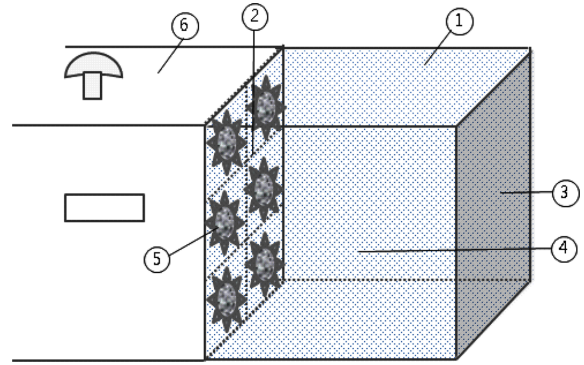


Fig. 3. A dust-proof screen chamber attached to the side wall equipped with multi-ventilation fans, of enclosed poultry building: 1. Roof; 2. Rear of the dust-proof screen chamber facing the side wall equipped with multi-ventilation fans; 3. Front; 4. Sides; 5. Ventilation fans; 6. Enclosed poultry building.

분진이 전술된 네 방향으로 누출되는 부피오염원의 정의와 일치하므로, 본 연구에서는 악취 및 분진 오염원으로서의 무창형 계사의 측벽과 연결된 방진망 구조물과 개방형 계사를 CALPUFF 모델링에서 각각 부피오염원으로 간주하였다. 한편 무창형 계사에서 방진망 구조물의 roof에서 지면에 수직방향으로 배출하는 배기량을, 방진망 구조물의 총 배출면적인 front, 양 side와 roof의 총 면적(i.e., A+2B+C)으로 배분하여서, 배출면적을 가중치로 한 수직 배기의 평균 선속도인 모델 배출 선속도(u_v^M)를 구하였다. 이와 같은 모델 배출 선속도로 배기하는 지면과 수직인 배출구를 가지는 일반적인 점오염원으로 간주하여 CALPUFF 모델링을 수행하고 전자의 부피오염원(volume source)인 경우의 CALPUFF 모델링 수행 결과와 비교하였다. 후자와 같이 일반적인 점오염원으로 간주할 경우에는 지면과 수직인 모델 상의 배출구의 배출면적이 방진망 구조물의 roof 면적보다 매우 크게 계산되는데, 실제의 무창형 계사에서 방진망 구조물의 front 면과 양 side 면으로, 즉 지면과 평행으로 지속적으로 운동량(momentum)을 가지고 배출되는 배기가스의 악취 및 분진농도를, 후자의 지면과 수직인 모델 상의 배출구의 배출 단면적 내에서 균일하다고 간주하였다.

2-2-2-1. 부피오염원에서의 모델인자 계산

무창형 계사 P1 및 P2의 방진망 구조물의 dimension은 각각 7 m(L)×16 m(W)×7 m(H)과 10 m(L)×20 m(W)×10 m(H)이었다. 개방형 계사 P3의 경우는 6개의 계사로 구성되는데, 각 계사의 창문

Table 8. Volume source parameters and emission rates of odor (ammonia and hydrogen sulfide) and particulate matters (PM_{2.5} and PM₁₀) for CALPUFF modeling from the major poultry farms in the area of Seongju

Name	Zone	X (km)	Y (km)	Effective Height (m)	Base Elevation (m)	σ_{y0} (m)	σ_{z0} (m)	NH ₃ (g/s)	H ₂ S (g/s)	PM _{2.5} (g/s)	PM ₁₀ (g/s)
P1	52S	440.217	3973.138	3.5	40	2.46	3.26	1.095	0.013	0.00802	0.117
P2	52S	436.718	3966.691	5.0	56	3.29	4.65	0.938	0.011	0.00688	0.100
P3	52S	433.518	3977.533	1	51	5.70	0.93	0.328	0.001	0.00344	0.050

높이, 창문 폭, 및 창문 끝과 가까운 계사 끝(edge) 사이의 거리는 각각 2 m, 28.26 m 및 0.6 m이었다. 따라서 각 부피오염원의 모델 인자인 σ_{y0} (initial sigma y)과 σ_{z0} (initial sigma z)의 값은 참고문헌 [36]의 방법으로 구하였으며, 그 값들을 Table 8에 나타내었다. 또한 악취오염원(i.e., 암모니아 및 황화수소) 및 분진(i.e., PM_{2.5}와 PM₁₀)의 배출계수를 각각 Table 2 및 3과 같이 구하고, 구한 배출계수에 Table 1의 계사 당 사육수를 곱하여 산정된 각 배출량의 값을 Table 8과 같다.

2-2-2-2. 점오염원에서의 모델인자 계산

기준 설계인자로서 계사 내 중앙에서의 입기 및 배기되는 환기류의 요구되는 대기의 선속도를 0.25 m/s[37]으로 하여, 다음과 같이 예비 CALPUFF 모델링과 최종 CALPUFF 모델링의 경우의 모델인자를 계산하였다. 예비 CALPUFF 모델링의 경우에는 계사에서 측벽배기 유량이, 배기 fan들의 배출속도로 지면에서 수직방향인 배출구로 배출되게 예비설계를 하였다. 한편 최종 CALPUFF 모델링에서는, 예비설계인자에서의 배기가스의 배출속도보다 저감된 배기가스의 배출속도와 예비설계인자에서의 배출구 단면적보다 확장된 배출구의 지름을 설계인자로서 제공하였다.

2-2-2-2-1. 예비 CALPUFF 모델링을 위한 계사의 예비설계인자구축

예비 설계인자로서, 무창형 계사의 측벽배기 유량이 배출구에서 수직방향으로 배출되게 하고 배출구 단면적은 fan들이 차지하는 총 면적으로 하는 기본설계를 하였다. 무창형 계사 P1 및 P2의 측벽에 설치된 fan 수는 각각 30개 및 36개였고, 각 fan을 둘러싸는 정사면체(square)의 dimension은 각각 1.5 m × 1.5 m 및 1 m × 1 m이었다. 한편 개방형 계사 P3의 경우는 계사내부의 순환 fan들이 가동하는 복합적 환기방식을 수행하기 때문에, 창문에서의 배기 선속도가 환기류의 요구되는 선속도인 0.25 m/s와 동일하다고 가정하였다. 예비 CALPUFF 모델링을 위하여 무창형 계사 P1 및 P2와 개방형 계사 P3에서 산출된 배출관련 설계인자는 Table 9와 같으며, 이를 기본으로 한 총 예비설계인자는 Table 10과 같다.

2-2-2-2-2. 최종 CALPUFF 모델링을 위한 계사의 설계인자 구축

예비설계인자의 점오염원 배출구에서의 배기가스의, Table 10에 나타난 배출속도보다 저감된 배기가스의 배출속도와, 예비설계인자에서의 점오염원 배출구 단면적보다 확장된 배출구의 단면적(또는 배출구 지름)을 최종설계인자로서 Table 11과 같이 도출하였다. 터널형 배기를 하는 무창형 계사에서 Fig. 3과 같은 방진망 구조물의 roof (C=roof 면적)에서 지면에 수직방향으로 배출하는 배기량, 방진망 구조물의 front, 양 side와 roof의 총 면적(i.e., A+2B+C)으로 배분한 모델 배출 선속도(u_y^M)를 구하여서, 이와 같은 모델 배출 선속도로 배기하는 지면과 수직인 배출구를 가지는 일반적인 점오염원으로 간주하여 CALPUFF 모델링을 수행하였다. 실제의 무창형 계사에서 방진망 구조물의 front 면과 양 side 면으로, 즉 지면과 평행으로 지속적으로 운동량(momentum)을 가지고 배출되는 배기가스의 악취 및 분진농도를, 방진망 구조물의 roof 면적인 C보다 매우 크게 설계되는 최종 CALPUFF 모델 상의 배출구의 배출 단면적 내에서 균일하다고 간주하였다. 터널형 배기를 수행하는 무창형 계사의 최종 CALPUFF 모델링에서의 모델 배출 선속도(u_y^M)를 구하는 방법은 다음과 같다.

무창형 계사의 측벽배기면(i.e., fan 설치면)에서 나오는 총 배기량(Q)은, 계사 내 중앙에서의 입기 및 배기되는 환기류의 요구되는 대기의 선속도(u)인 0.25 m/s[37]에 방진망 구조물의 rear 면적인 A

Table 11. Design factors regarding the stack of point sources for finally adjusted CALPUFF modeling from the major poultry farms in the area of Seongju

Poultry farms	Enclosed P1	Enclosed P2	Open P3
Ventilation rates (m ³ /min)	1,680	3,000	-
Exit velocity (u_y^M) (m/s)	0.03	0.028	0.02
Stack height (m)	3.50	5.00	1.00
Stack diameter (m)	34.34	47.89	73.5

Table 9. Design factors regarding the stack of point sources for preliminary CALPUFF modeling from the major poultry farms in the area of Seongju

Poultry farms	Enclosed P1	Enclosed P2	Open P3
Ventilation rates (m ³ /min)	1,680	3,000	-
Linear velocity of emitted air at the area occupied by fans (m/s)	0.41	1.39	N/A
Stack height (m)	3.50	5.00	1.00
Stack diameter (m)	9.3	6.8	20.8

Table 10. Point source parameters and emission rates of odor (ammonia and hydrogen sulfide) and particulate matters (PM_{2.5} and PM₁₀) for preliminary CALPUFF modeling from the major poultry farms in the area of Seongju

Name	Zone	X (km)	Y (km)	Stack Ht. (m)	Base Elev. (m)	Stack Diam. (m)	Exit Velo. (m/s)	Exit Temp. (K)	NH ₃ (g/s)	H ₂ S (g/s)	PM _{2.5} (g/s)	PM ₁₀ (g/s)	TSP (g/s)
P1	52S	440.217	3973.138	3.5	40	9.3	0.41	315.15	1.095	0.013	0.00802	0.11667	0.45938
P2	52S	436.718	3966.691	5	56	6.8	1.39	315.15	0.938	0.011	0.00688	0.1	0.39375
P3	52S	433.518	3977.533	1	51	20.8	0.25	315.15	0.328	0.001	0.00344	0.05	0.19688

를 곱한 값으로 나타낸다. 이러한 총 배기량(Q)은 방진망 구조물의 rear(A=rear 면적)를 통과한 후에, Fig. 3과 같이 방진망 구조물의 front (A=front 면적), 2 면의 sides (B=side 면적)와 roof (C=roof 면적)의 4 면으로 배출된다. 이러한 4 면으로 배출되는 배기가스의 방진망 통과 선속도(U)는 식 (3)과 같다.

$$U = \left(\frac{A}{A+2B+C} \right) u \tag{3}$$

실제 방진망 구조물의 roof(C=roof 면적)에서 지면과 수직으로 배출되는 puff 유량은 UC로 표현되며, 이러한 puff 유량을 방진망 구조물의 총 배출면적(i.e., A+2B+C)으로 분산하여 최종 CALPUFF 모델에서의 배출구에서 모델 배출 선속도(u_y^M)를 식 (4)와 같이 산출하였다.

$$u_y^M = \frac{C}{A+2B+C} U = \frac{AC}{(A+2B+C)^2} u \text{ where } u = 0.25 \text{ m/s} \tag{4}$$

그러므로 총 배기량(Q)은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$Q = uA = u_y^M \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right) \tag{5}$$

where d denotes the diameter of a stack as a design parameter of finally adjusted CALPUFF modeling.

식 (4)와 (5)로부터 최종 CALPUFF 모델링에서의 점오염원의 배출구 지름(d)은 식(6)과 같이 표현된다.

$$d = \frac{A+2B+C}{\sqrt{C}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \tag{6}$$

따라서 최종 CALPUFF 모델링의 모델인자로서 배출구에서의 모델 배출구속도(u_y^M)는 Table 12에서와 같이 무창형 계사 P1 및 P2에서 각각 0.03 m/s 및 0.028 m/s이다. 또한 배출구의 지름(d)은 Table 12에서와 같이 무창형 계사 P1 및 P2에서 각각 34.34 m 및 47.89 m이다.

한편 6개의 개방형 계사로 구성된 P3의 총 윈치 커튼 창문(면적: α)에서 나오는 배기량(q)은, 계사 내 중앙에서의 입기 및 배기되는 환기류의 요구되는 대기의 선속도(u)인 0.25 m/s[37]에 총 윈치 커튼 창문면적(α)를 곱한 값으로 식 (7)과 같이 나타내며, 총 윈치 커튼 창문면적(α)은 단일 개방형 계사의 윈치 커튼 창문면적의 6배이다. 최종 CALPUFF 모델링에서 점오염원의 배출구에서의 배출 선속도를 2 cm/s으로 가정하였을 때에, 최종 CALPUFF 모델링의 설계인자로서 점오염원의 배출구 지름(d)은 Table 12에서와 같이 73.5 m로 구해진다.

$$q = u(0.25 \text{ m/s}) \times \alpha = 0.02 \text{ m/s} \times \frac{\pi}{4} d^2 \tag{7}$$

where $\alpha = (28.26 \times 2) \text{ m}^2/\text{farm} \times 6 \text{ farms} = 339.12 \text{ m}^2$

2-2-3. CALPUFF 모델링 분석방법

실제 민원을 유발하는 것은 악취의 시간평균농도가 아니라, 대기 중의 난류에 의하여 악취농도가 시간에 따라서 급격히 변화하는 악취의 특성을 고려할 때에 순간적으로 첨두(peak)를 나타내는 첨두 악취농도(peak odor concentration)이다. 따라서 악취모델예측에서 첨두농도 또는 최대농도(maximum concentration)를 적용하는 것이 매우 중요하다. 현재까지 악취모델예측을 위한 악취모델은 본 연구에서 수행한 CALPUFF 모델이 적합하다고 알려져 있으나, 이와 같은 첨두농도를 악취모델에 적용하는 것은 초당 변화하는 기상장의 측정데이터 등 방대한 정보가 필요하며 아직까지는 현실적으로 어려운 점이 있다. 또한 CALPUFF 모델링은 현장조사보다 경제적인 방법임에도 불구하고 일시적 배출은 시공과 배출량에 관한 불확실성 때문에 신뢰할 수준으로 모델링하기 어렵다. 따라서 본 연구에서의 악취모델링 결과분석 방법으로서 암모니아 및 황화수소의 최대농도를 산출하여 활용하였다. 또한 분진오염원인 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 경우도 마찬가지로 CALPUFF 모델링에서 최대농도를 산출하여 활용하였다.

따라서 본 연구에서는 주요 계사인 P1 및 P2 각각의 민원지역 (P1 및 P2에서 각각 153 m와 352 m의 거리)과 P3 근처(P3에서 200 m) 위치를 discrete receptor로서 간주하고 CALPUFF 모델을 수행하여, 각 민원지역에서 악취오염원인 암모니아와 황화수소 및 분진오염원인 PM_{2.5} 및 PM₁₀, 각각의 최고 농도(RANK 1, 2, 3 및 4)를 산출하고, 복합악취의 악취방지법 상의 부지경계기준[i.e., 암모니아, 1 ppm (7.6×10⁻⁴ g/m³); 황화수소, 20 ppb (3.04×10⁻⁵ g/m³)]과 대기 환경법의 분진허용기준(i.e., PM_{2.5}, 24시간 평균치 50 µg/m³ 이하; PM₁₀, 24시간 평균치 100 µg/m³ 이하)과 비교하고 요구되는 악취 및 분진방지설비의 제거율에 대해서 논의하였다. 이와 같이 주요 계사인 P1, P2 및 P3와, 각각의 민원지역 또는 근처 위치의 discrete receptor와 상관관계를 도출하였다. 그러나 CALPUFF 모델링을 수행한 결과가 악취방지법의 부지경계기준에 거의 도달하는 경우에는, CALPUFF 모델링 결과는 1시간 평균이고 공정시험법의 시료채취 시간은 5분 이하이므로 이를 기준으로 5분 평균으로 CALPUFF 모델링 하는 경우에는 식 (2)에 의한 첨두농도 효과에 의하여 CALPUFF 모델링 결과의 약 1.64배(i.e., (60 min/5 min)^{0.2})로 높아질 수 있으므로 첨두농도가 부지경계기준을 초과하여 민원을 초래할 수 있다고 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 점오염원(point source)

3-1-1. 점오염원으로서 예비 CALPUFF 모델링(preliminary CALPUFF modeling)

3-1-1-1. 예비 CALPUFF 모델링 수행 결과

성주지역(30 km × 30 km)의 겨울(1/15), 봄(4/15), 여름(7/15) 및

Table 12. Point source parameters and emission rates of odor (ammonia and hydrogen sulfide) and particulate matters (PM_{2.5} and PM₁₀) for finally adjusted CALPUFF modeling from the major poultry farms in the area of Seongju

Name	Zone	X (km)	Y (km)	Stack Ht. (m)	Base Elev. (m)	Stack Diam. (m)	Exit Velo. (m/s)	Exit Temp. (K)	NH ₃ (g/s)	H ₂ S (g/s)	PM _{2.5} (g/s)	PM ₁₀ (g/s)	TSP (g/s)
P1	52S	440.217	3973.138	3.5	40	34.34	0.03	298	1.095	0.013	0.00802	0.11667	0.45938
P2	52S	436.718	3966.691	5	56	47.89	0.028	298	0.938	0.011	0.00688	0.10000	0.39375
P3	52S	433.518	3977.533	1	51	73.5	0.02	298	0.328	0.001	0.00344	0.05000	0.19688

가을(10/15)의 계절별 및 아침(8 am), 낮(1 pm), 저녁(5 pm) 및 밤(10 pm)의 시간대별의 바람장 분포의 모델예측, 및 대규모 계사(P1, P2 및 P3)로 부터의 암모니아, 황화수소, PM_{2.5} 및 PM₁₀ 확산에 대한 예비 CALPUFF 모델링 수행 결과는 각각 악취방지법 또는 대기환경법 기준보다 매우 낮게 나타났다.

3-1-1-2. Discrete receptor에서의 예비 CALPUFF 모델링 수행 결과 대규모 계사인 P1 및 P2 각각의 민원지역과 P3 근처를 discrete receptor로서 간주하고, CALPUFF 모델을 수행하여 discrete receptor에서 암모니아, 황화수소, PM_{2.5} 및 PM₁₀ 각각의 최고 농도(1,2,3 및 4RANK)를 Fig. 4와 같이 산출하였다. 그 결과로서 P1 및 P2 각각의 민원지역과 P3 근처 위치한 discrete receptor에서의 암모니아, 황화수소, PM_{2.5} 및 PM₁₀의 1RANK 농도도 Fig. 4와 같이 모두 악취방지법 또는 대기환경법 기준보다 낮게 나타났다. 이러한 결과는 예비 CALPUFF 모델링에서, 계사에서의 배기 유량이 배기 fan에 의한 배출속도로 지면에서 수직방향인 배출구로 배출되게 예비설계를 한 결과로서 배출된 오염원의 실제보다 과장된 대기확산에 기인하였다.

3-1-2. 점오염원으로서 최종 CALPUFF 모델링(finally adjusted CALPUFF modeling)

3-1-2-1. 점오염원으로서 최종 CALPUFF 모델링 수행 결과

P1 및 P2 각각의 민원지역과 P3 근처를 discrete receptor로서 간주하고 점오염원으로서 최종 CALPUFF 모델링을 수행하여 악취오염원인 암모니아와 황화수소 및 분진 PM_{2.5}와 PM₁₀ 각각의 최고 농도(RANK 1, 2, 3 및 4)를 Fig. 5와 같이 산출하였다. 위와 같은 점오염원으로서 최종 CALPUFF 모델링 수행 결과를 부피오염원으로서 CALPUFF 모델링 수행 결과와 “3-2-1. 부피오염원으로서 CALPUFF 모델링 수행 결과 및 최종 CALPUFF 모델링과 비교”에서 상호 비교하였다.

3-1-2-2. CALPUFF 모델링 수행결과를 통한 P1, P2 및 P3의 방지설비 요구제거율

최종 CALPUFF 모델링을 수행하여 악취오염원인 암모니아와 황화수소 및 분진 PM_{2.5}와 PM₁₀ 각각의 최고 농도 중에서 RANK 1들을, 복합악취의 악취방지법 상의 부지경계기준과 대기환경법의 분

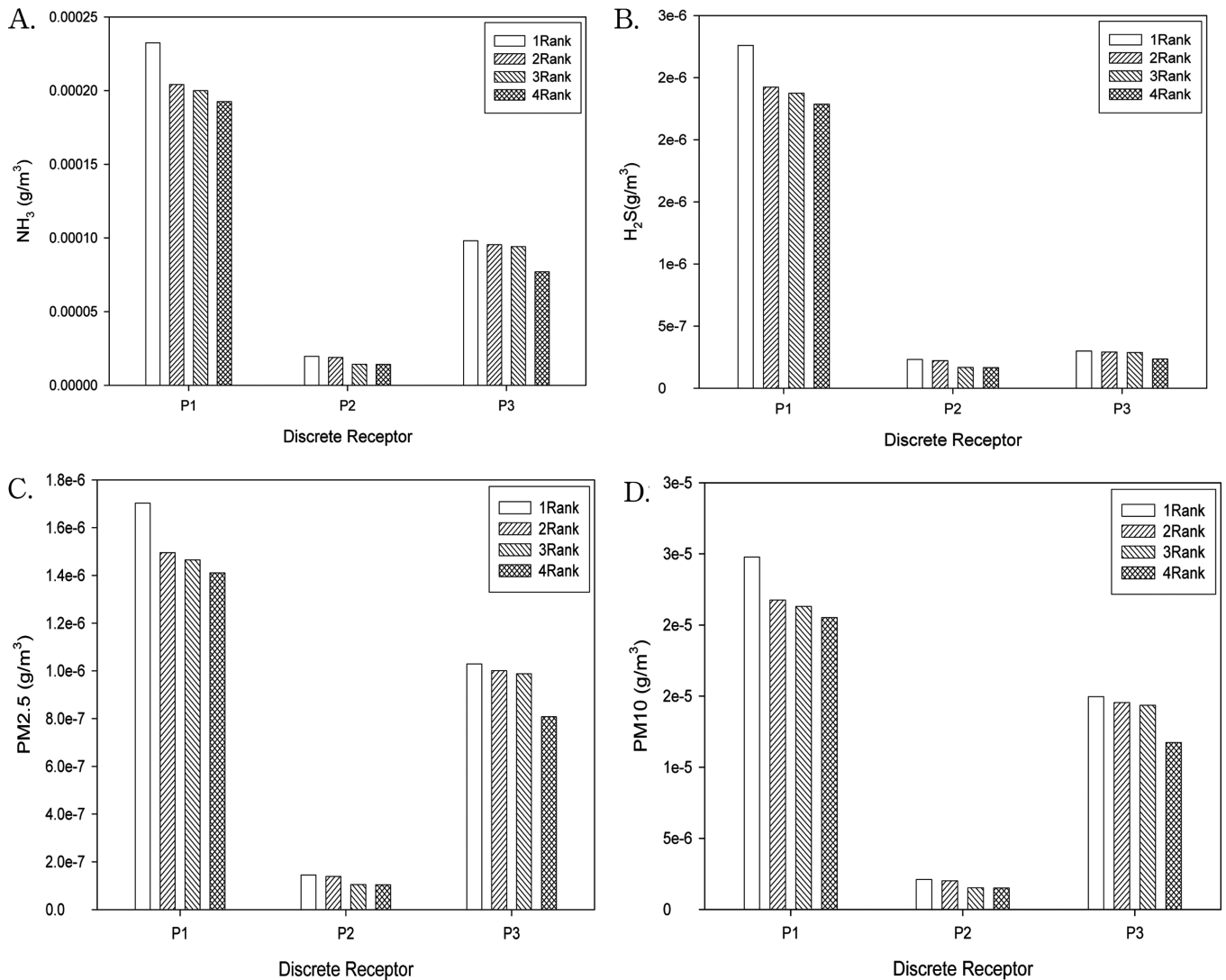


Fig. 4. Odor (ammonia(A) and hydrogen sulfide(B)) and particulate matter (PM_{2.5}(C) and PM₁₀(D)) concentrations of 1st through 4th ranking at discrete receptors of P1, P2 and P3 in the year of 2016, predicted by preliminary CALPUFF modeling; 1RANK (P1(7/9/22:00), P2 (8/3/22:00) and P3 (7/15/18:00)), 2RANK (P1(5/23/13:00), P2 (8/10/20:00) and P3 (9/17/14:00)), 3RANK (P1(7/30/08:00), P2 (8/3/04:00) and P3 (5/4/16:00)), and 4RANK (P1(7/27/15:00), P2 (8/3/03:00) and P3 (9/4/16:00)).

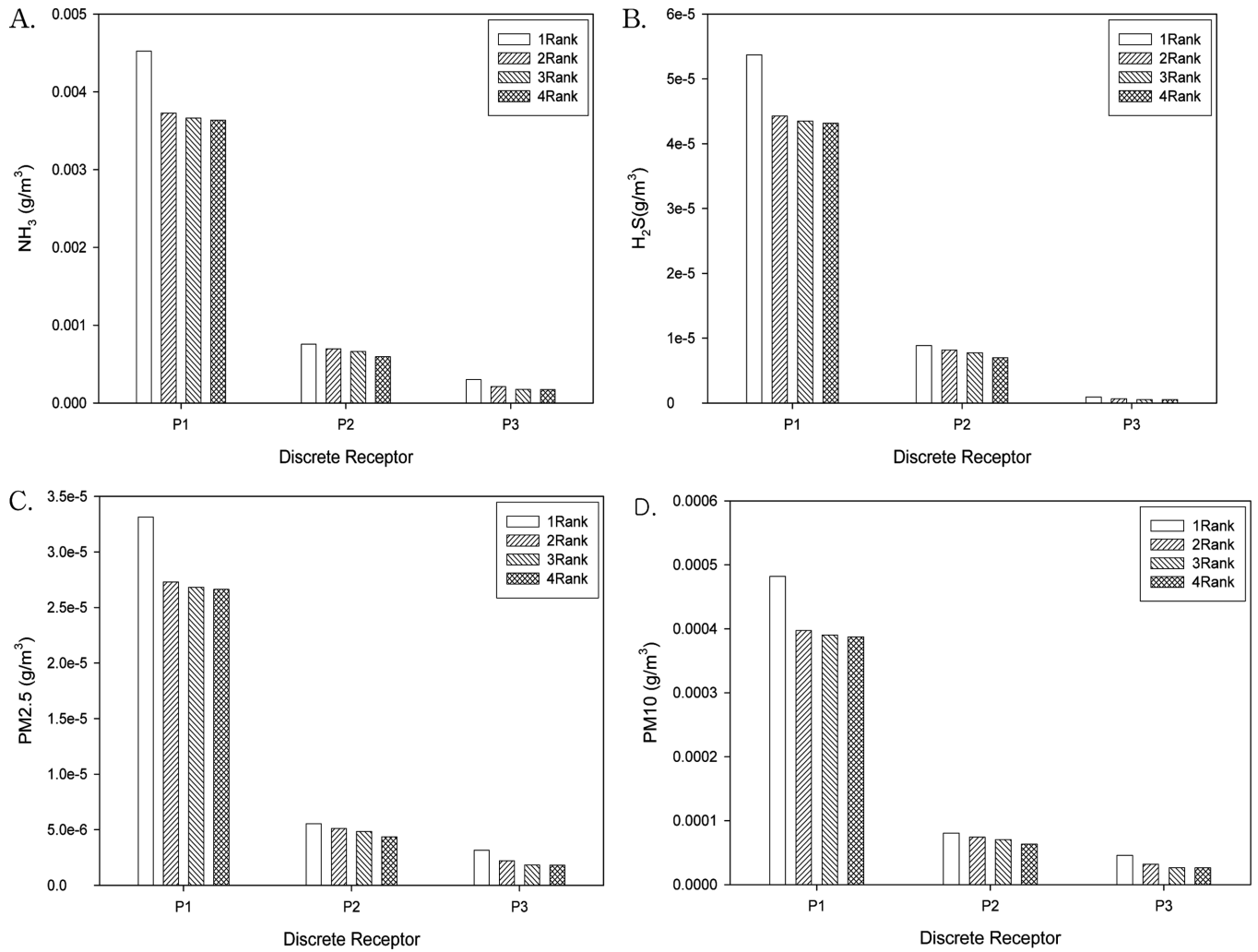


Fig. 5. Odor (ammonia(A) and hydrogen sulfide(B)) and particulate matter (PM_{2.5}(C) and PM₁₀(D)) concentrations of 1st through 4th ranking at discrete receptors of P1, P2 and P3 in the year of 2016, predicted by finally adjusted CALPUFF modeling; 1RANK (P1(7/9/22:00), P2 (8/3/22:00) and P3 (7/15/18:00)), 2RANK (P1(5/23/13:00), P2 (8/10/20:00) and P3 (9/17/14:00)), 3RANK (P1(7/30/08:00), P2 (8/3/04:00) and P3 (5/4/16:00)), and 4RANK (P1(7/27/15:00), P2 (8/3/03:00) and P3 (9/4/16:00)).

진허용기준과 비교하고 요구되는 악취 및 분진방지설비의 제거율을 Table 13과 같이 산출하였다. 이와 같은 Table 13에서 요구되는 악취 및 분진방지설비의 제거율은, “P1, P2 및 P3에서 각각의 배출농도를 줄인 비율만큼 각각의 discrete receptor에서의 농도가 같은 비율로 감소한다”는 가정(*a priori* assumption) 하에 성립되었다.

3-1-2-3. P1, P2 및 P3의 방지효율에 따른 discrete receptor에서의 1RANK 농도추이 및 P1, P2 및 P3의 방지설비 요구제거율

P1, P2 및 P3를 각각 점오염원으로 간주하여, 각 계사의 배출 오염원에 대한 방지설비의 방지효과에 의하여 배출 오염원의 emission rate가 100%(방지설비 없음), 80%(20% 제거율), 50%(50% 제거율) 및 20%(80% 제거율)로 설정되었을 때에 각각 CALPUFF 모델링을 수행하여, P1, P2 및 P3 각각의 discrete receptor에서의 각 오염원 농도를 Fig. 6과 같이 예측하였다. 또한 P1, P2 및 P3에서 각 오염원의 요구되는 제거율은 Table 14와 같이 산출되었고, Table 13의 요구되는 악취 및 분진방지설비의 제거율과 매우 유사하였다. 따라서 “P1, P2 및 P3에서 각각의 배출농도를 줄인 비율만큼 각각의 discrete receptor에서의 농도가 같은 비율로 감소한다”는 가정(*a priori* assumption)이 본 점오염원의 CALPUFF 모델링 범위에서

Table 13. Required removal efficiencies by the performance of pollution control facilities according to the 1RANK-result of point source-CALPUFF modeling

Point source	Ammonia	Hydrogen sulfide	PM _{2.5}	PM ₁₀
P1	83.5	43.7	OK	79.2
P2	Border line	OK	OK	OK
P3	OK	OK	OK	OK

1. Border line denotes that pollution control facilities may be needed.
2. OK denotes no need of any pollution control facility.

적용 가능성이 입증되었다.

3-2. 부피오염원(volume source)

3-2-1. 부피오염원으로서 CALPUFF 모델링 수행 결과 및 최종 CALPUFF 모델링과 비교

P1 및 P2 각각의 민원지역과 P3 근처를 discrete receptor로서 간주하고 부피오염원으로서 CALPUFF 모델을 수행하여 악취오염원인 암모니아, 황화수소, PM_{2.5} 및 PM₁₀ 각각의 최고 농도(RANK 1, 2, 3 및 4)를 Fig. 7과 같이 산출하였다. 이와 같이 무창형 계사 방진

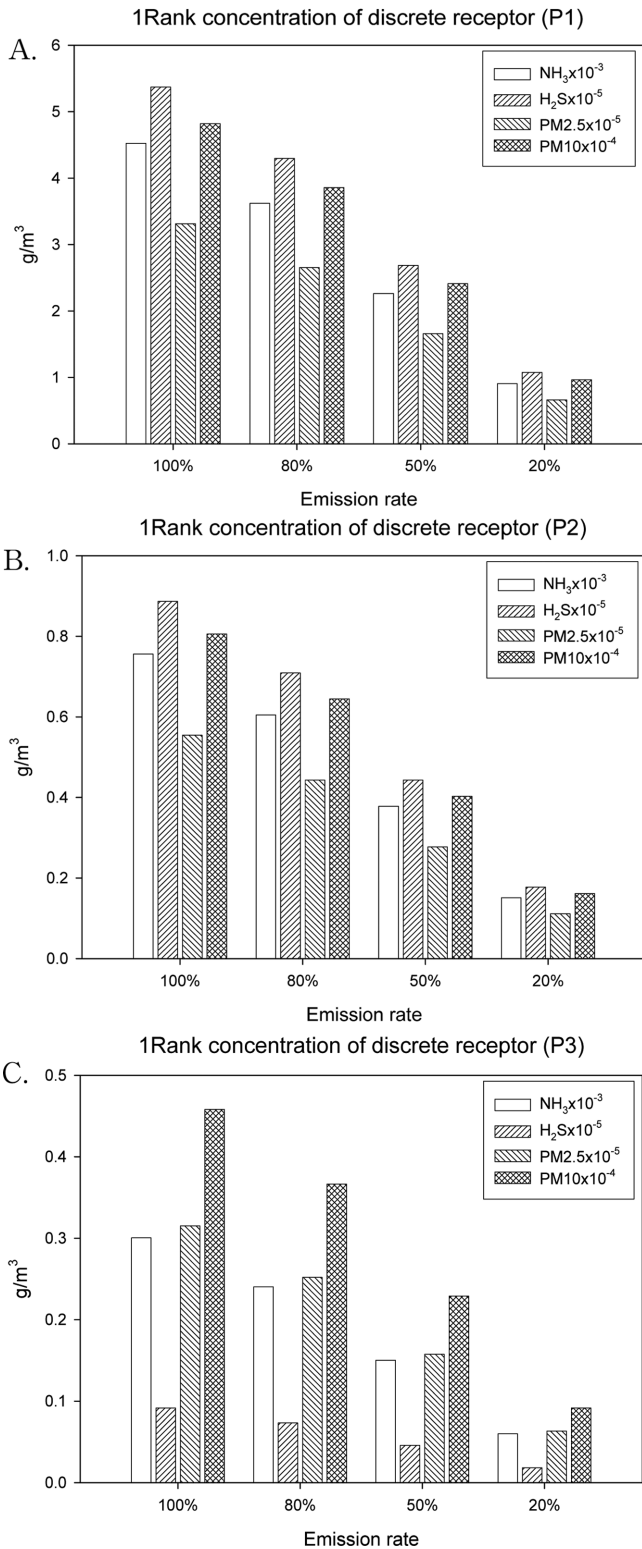


Fig. 6. 1st ranked-concentration of emitting gas from poultry farms (P1(A), P2(B) and P3(C)), at a corresponding discrete receptor, predicted by finally adjusted CALPUFF modeling, assuming being treated by pollution control facilities with the removal efficiencies of 0, 20, 50 and 80% corresponding to the pollutant emission rates of 100, 80, 50 and 20%, respectively.

망 구조물(chamber)을 부피오염원으로 간주하여 CALPUFF 모델링한 결과(Fig. 7)를, 점오염원으로 간주한 최종 CALPUFF 모델링

Table 14. Required removal efficiencies by the performance of pollution control facilities, based on the 1RANK-result of point source-CALPUFF modeling, assuming being treated by pollution control facilities with the removal efficiencies of 0, 20, 50 and 80% corresponding to the pollutant emission rates of 100, 80, 50 and 20%, respectively.

Point source	Ammonia	Hydrogen sulfide	PM _{2.5}	PM ₁₀
P1	80	20-50	OK	80
P2	Border line	OK	OK	OK
P3	OK	OK	OK	OK

1. Border line denotes that pollution control facilities may be needed.
2. OK denotes no need of any pollution control facility.

수행결과(Fig. 5)와 비교하였을 때에 서로 상당히 비슷한 결과를 확인하였다. 따라서 점오염원으로 간주한 최종 CALPUFF 모델링의 유효성을 입증하였다. 그럼에도 불구하고 P1의 경우에는 서로 상당히 유사하였으나, P2와 P3 경우에는 각각 부피오염원으로 간주하였을 때에 점오염원으로 간주할 때보다 암모니아와 황화수소 경우에 discrete receptor에서의 농도가 각각 2배 및 3배 정도 컸다.

3-2-2. CALPUFF 모델링 수행결과를 통한 P1, P2 및 P3의 방지설비 요구제거율

부피오염원을 적용하고 P1, P2 및 P3에서 배출농도를 방지시설로 저감한 비율만큼 각각의 discrete receptor에서 농도가 같은 비율로 감소한다고 가정(*a priori* assumption) 하였을 때에, P1, P2 및 P3 각각의 discrete receptor에서의 암모니아, 황화수소, PM_{2.5} 및 PM₁₀의 최고 농도 중에서 RANK 1들을, 복합악취의 악취방지법 상의 부지경계기준과 대기환경법의 분진허용기준으로 제어하기 위해서는 Table 15와 같은 방지시설의 제거효율이 필요하였다. 부피오염원을 적용한 Table 15와 같은 방지시설의 요구제거효율은 점오염원을 적용한 Table 13의 경우와 비교하였을 때에 P1의 경우에는 상호간에 유사하였으나, P2와 P3에서 암모니아와 PM10의 경우에 더 높게 나타났다. 최고농도 RANK 1 뿐만 아니라 RANK 2, 3 및 4를 포함한 RANK 1~4의 경우에; 1) 암모니아 경우는, P1에서 1RANK와 2~4 RANK의 경우는 악취배출 방지장치의 제거효율이 각각 약 86% 및 약 81% 이상의 제거효율이 필요하였고; P2에서는 1~4RANK의 경우에 악취배출 방지장치의 약 70% 이상의 제거효율이 필요하였고; P3에서는 1~4RANK의 경우에 악취배출 방지장치의 약 42% 이상의 제거효율이 필요하였다. 2) 황화수소 경우는, P1에서 1RANK의 경우는 악취배출 방지장치의 제거효율이 약 55% 이상이 요구되었으나, 2~4RANK의 경우는 약 45% 이상의 제거효율이 필요하였고; P2에서는 1~4RANK의 경우에 부지경계기준에 거의 도달하였으나, 민원을 초래할 수 있었고; P3에서는 1~4RANK의 경우에 부지경계기준을 충족하였다. 3) PM_{2.5} 경우는, P1, P2 및 P3 모두에서 대기환경법 기준을 충족하였다. 4) PM₁₀ 경우에는, P1에서 1RANK의 경우는 분진배출 방지장치의 약 83% 이상의 제거효율이 필요하였으나, 2~4RANK의 경우는 약 75% 이상의 제거효율이 필요하였고; P2에서는 1~4RANK의 경우에 분진배출 방지장치의 약 70% 이상의 제거효율이 필요하였고; P3에서는 1~4RANK의 경우에 분진배출 방지장치의 약 50% 이상의 제거효율이 필요하였다.

3-2-3. P1, P2 및 P3의 방지효율에 따른 discrete receptor에서의 1RANK 농도추이 및 P1, P2 및 P3의 방지설비 요구제거율

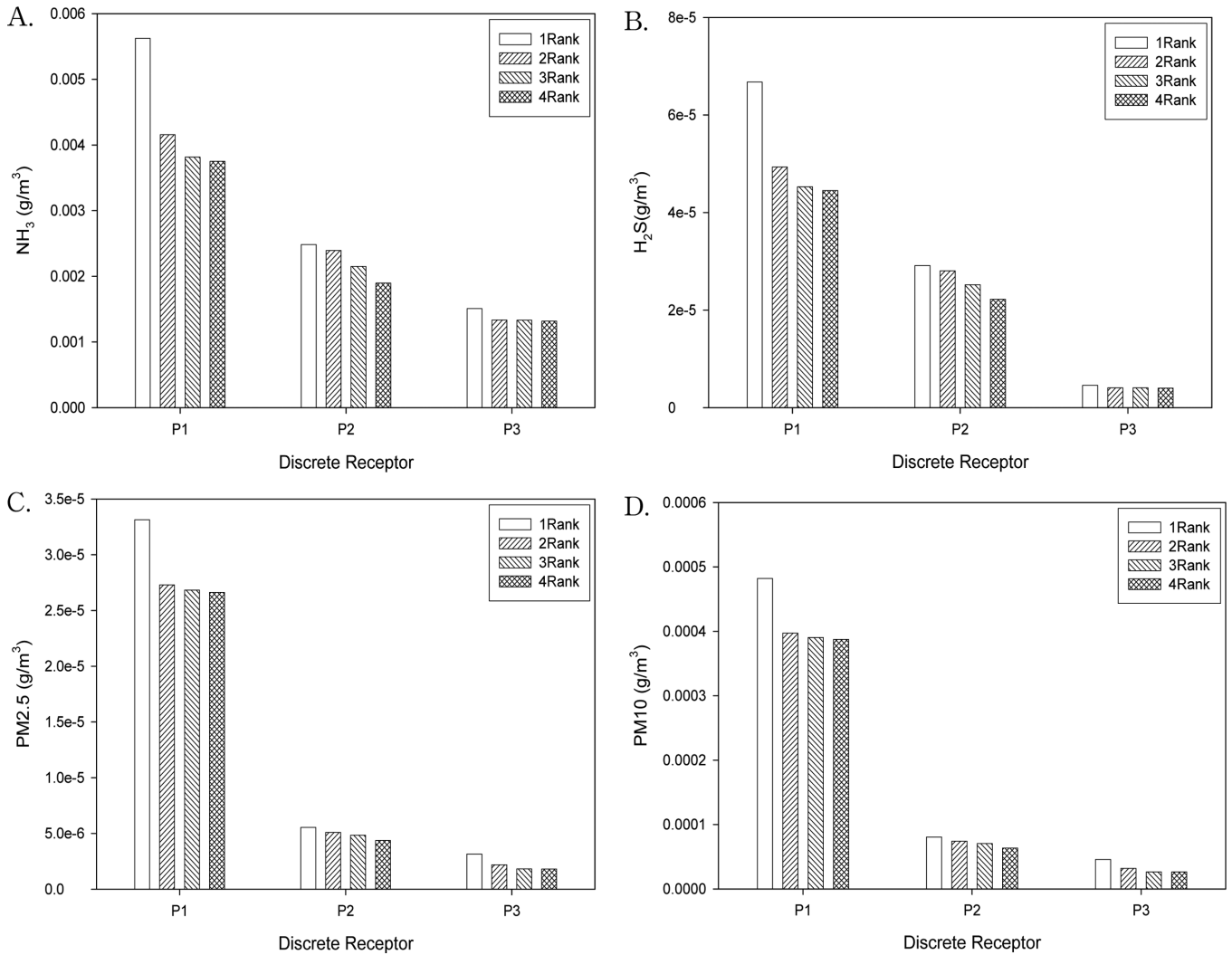


Fig. 7. Odor (ammonia(A) and hydrogen sulfide(B)) and particulate matter (PM_{2.5}(C) and PM₁₀(D)) concentrations of 1st through 4th ranking at discrete receptors of P1, P2 and P3 in the year of 2016, predicted by volume source CALPUFF modeling; 1RANK (P1(7/9/22:00), P2 (2/25/02:00) and P3 (6/23/02:00)), 2RANK (P1(7/28/03:00), P2 (3/28/02:00) and P3 (6/2/03:00)), 3RANK (P1(4/21/00:00), P2 (2/25/18:00) and P3 (5/28/04:00)), and 4RANK (P1(10/5/22:00), P2 (10/9/03:00) and P3 (6/23/03:00)).

Table 15. Required removal efficiencies by the performance of pollution control facilities according to the 1RANK-result of volume source-CALPUFF modeling

Volume source	Ammonia	Hydrogen sulfide	PM _{2.5}	PM ₁₀
P1	86	55	OK	83
P2	70	Border line	OK	70
P3	42	OK	OK	50

1. Border line denotes that pollution control facilities may be needed.
 2. OK denotes no need of any pollution control facility.

P1, P2 및 P3를 각각 부피오염원으로 간주하여, 각 계사의 배출 오염원에 대한 방지설비의 방지효과에 의하여 배출 오염원의 emission rate가 100% (방지설비 없음), 80% (20% 제거율), 50% (50% 제거율) 및 20% (80% 제거율)로 설정되었을 때에 각각 CALPUFF 모델링을 수행하여, P1, P2 및 P3 각각의 discrete receptor에서의 각 오염원 농도를 Fig. 8과 같이 예측하였다. 부피오염원으로 간주한 Fig. 8을 점오염원으로 간주한 최종 CALPUFF 모델링 결과 (Fig. 6)와 비교하였을 때에, P1의 경우에는 서로 상당히 유사하였

으나 P2와 P3 경우에는 Fig. 8에서 discrete receptor의 농도가 각각 2배 및 3배 정도 컸다.

P1, P2 및 P3 각각의 discrete receptor에서의 암모니아, 황화수소, PM_{2.5} 및 PM₁₀의 1RANK 농도를 복합악취의 악취방지법 상의 부지경계기준과 대기환경법의 분진허용기준으로 제어하기 위해서는 Table 16과 같은 방지시설의 제거효율이 필요하였다. 1) 암모니아 경우는, P1과 P2에서는 악취배출 방지장치의 제거효율이 약 80% 이상이어야 하고; P3에서는 제거효율이 약 50% 이상의 제거효율이 필요하였다. 2) 황화수소 경우에는, P1에서는 악취배출 방지장치의 제거효율이 약 20~50%가 요구되고; P2에서는 부지경계기준에 거의 도달하였으나, 민원을 초래할 수 있었고; P3에서는 부지경계기준을 충족하였다. 3) PM_{2.5} 경우에는, P1, P2 및 P3 모두에서 대기환경법기준을 충족하였다. 4) PM₁₀ 경우에는, P1, P2 및 P3에서 각각 분진배출 방지장치의 약 80% 이상, 약 50~80% 및 약 50~80%의 제거효율이 필요하였다. 부피오염원을 적용한 Table 16과 같은 방지시설의 요구제거효율은, 점오염원을 적용한 Table 14의 경우와 비교하였을 때에 P1의 경우에는 상호간에 유사하였으나, P2와 P3

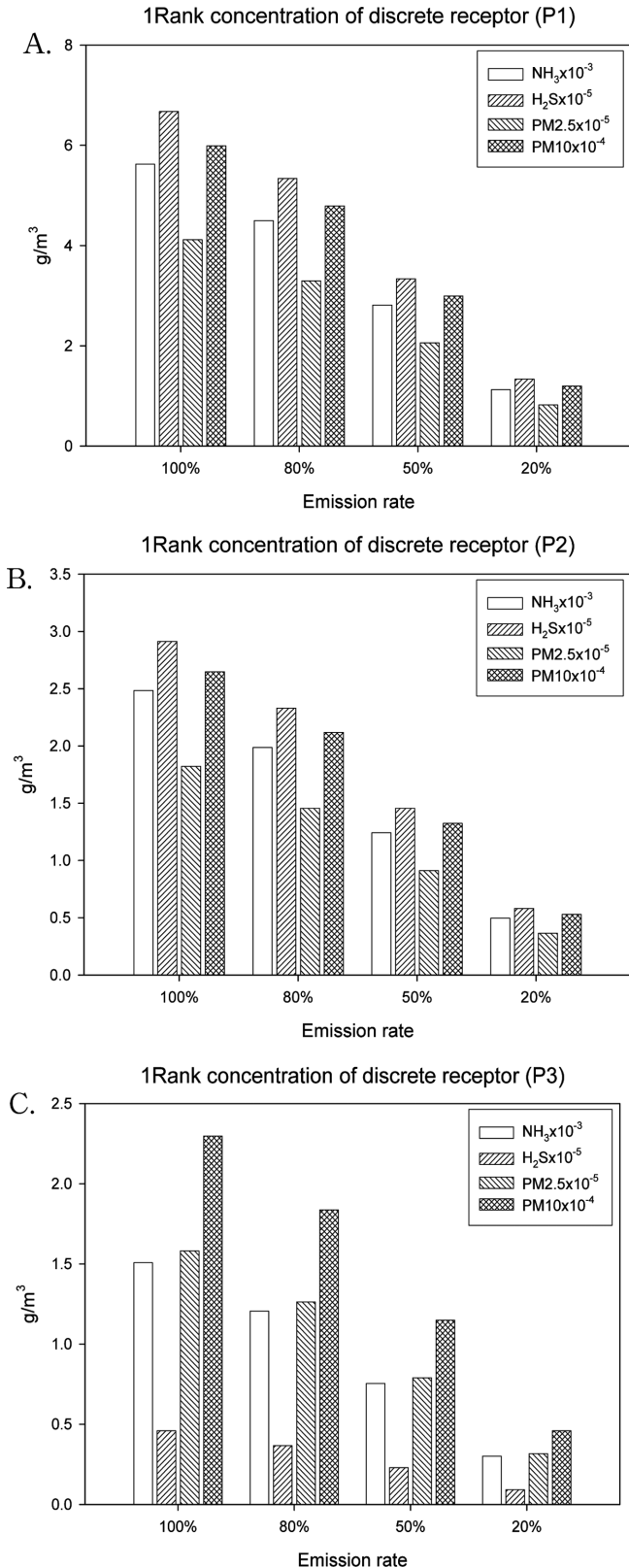


Fig. 8. 1st ranked-concentrations of emitting gas from poultry farms (P1(A), P2(B) and P3(C)), at a corresponding discrete receptor, predicted by volume source CALPUFF modeling, assuming being treated by pollution control facilities with the removal efficiencies of 0, 20, 50 and 80% corresponding to the pollutant emission rates of 100, 80, 50 and 20%, respectively.

Table 16. Required removal efficiencies by the performance of pollution control facilities, based on the 1RANK-result of volume source-CALPUFF modeling, assuming being treated by pollution control facilities with the removal efficiencies of 0, 20, 50 and 80% corresponding to the pollutant emission rates of 100, 80, 50 and 20%, respectively.

Volume source	Ammonia	Hydrogen sulfide	PM _{2.5}	PM ₁₀
P1	80	20~50	OK	80
P2	80	Border line	OK	50~80
P3	50	OK	OK	50~80

1. Border line denotes that pollution control facilities may be needed.
 2. OK denotes no need of any pollution control facility.

에서 암모니아와 PM10의 경우에 더 높게 나타났다. 한편 Table 16에서와 같이 P1, P2 및 P3에서 각 오염원의 요구되는 제거율은, “P1, P2 및 P3에서 각각의 배출농도를 줄인 비율만큼 각각의 discrete receptor에서의 농도가 같은 비율로 감소한다”는 가정 하에 성립되는 Table 15의 요구되는 악취 및 분진방지설비의 제거율과 매우 유사하였다. 따라서 점오염원의 CALPUFF 모델링과 마찬가지로, “P1, P2 및 P3에서 각각의 배출농도를 줄인 비율 만큼 각각의 discrete receptor에서의 농도가 같은 비율로 감소한다”는 가정(*a priori* assumption)이 본 부피오염원의 CALPUFF 모델링 범위에서도 적용 가능성이 입증되었다.

3-3. 악취 및 분진 방지의 요구수준

3-3-1. P1 및 P2의 각 무창형 계사 별 방진망 구조물(chamber)에서의 악취 및 분진 오염원 거동

본 연구에서는 무창형 계사 P1 및 P2의 방진망 구조물로부터 오염원 배출의 특성을 부피오염원으로서의 CALPUFF 모델링 또는 점오염원으로서의 최종 CALPUFF 모델링으로 구현하였다. 실제 오염원이 배출되는 무창형 계사의 방진망 구조물은, 악취 및 분진이 “2-2-2. Case study: 부피오염원(volume source) 및 점오염원(point source)”에서 전술된 네 방향으로 누출되는 부피오염원의 정의와 일치함에도 불구하고 오염원이 운동량(momentum)을 가지고 배출되는 무창형 계사의 방진망 구조물에서의 오염원 거동은, 운동량(momentum) 없이 확산에 의하여 오염원이 배출되는 부피오염원으로서 CALPUFF 모델링 거동과 운동량(momentum)을 가지고 오염원이 배출되는 점오염원으로서의 최종 CALPUFF 모델링 거동의 사이의 값으로 간주되었다. 그럼에도 불구하고 민원해결을 위한 안전한 접근방법으로서 부피오염원으로서 CALPUFF 모델링을 선정하였다.

3-3-2. 부피오염원으로서 CALPUFF 모델링 수행결과 비교

전술된 ‘3-2-2. CALPUFF 모델링 수행결과를 통한 P1, P2 및 P3의 방지설비 요구제거율’과 ‘3-2-3. P1, P2 및 P3의 방지효율에 따른 discrete receptor에서의 1RANK 농도추이 및 P1, P2 및 P3의 방지설비 요구제거율’의 CALPUFF 모델링 결과를 상호비교하면, P1, P2 및 P3의 각각의 discrete receptor에서의 1RANK 농도를 부지경계 기준으로 제어할 경우에는 악취 및 분진배출방지장치의 필요한 제거효율은 Tables 15와 16에서와 같이 거의 비슷하였다. 그럼에도 불구하고 3-2-2항의 결과는 “P1, P2 및 P3에서 각각의 배출농도를 줄인 비율만큼 각각의 discrete receptor에서의 농도가 같은 비율로 감

소한다”는 가정 하에 나온 결과이므로 3-2-3항의 결과를 더 신뢰하였다. 따라서 P1, P2 및 P3의 각 무창/개방 계사 별 악취 및 분진에 대한 해결방안을 도출하기 위하여 3-2-3항의 결과인 Table 16를 활용하였다.

3-3-3. P1 및 P2의 각 무창형 계사 별 악취 및 분진에 대한 정량적 방지수준

부피오염원으로서 CALPUFF 모델링을 수행한 Table 16과 같이, 무창형 계사 P1에서는 암모니아 제거효율이 80% 이상이고 황화수소 제거효율이 약 20~50%인 악취제거장치와, 약 80% 이상의 PM₁₀ 제거효율을 갖는 분진제거장치가 요구되었다. 총비용과 악취제거효율을 고려하였을 때에, 여과집진은 악취방제기술 중에서 최고의 선호도를 갖는다고 보고되고 있다[38]. 따라서 P1은 2중 방진망의 여과집진법을 사용하였다. 여과집진의 악취제거효율을 30%[38]로 간주하였을 때에 2중 방진망의 이론적 악취제거율은 $(0.3 + 0.7 \times 0.3) \times 100\%$ 로서 51%이었다. 한편 여과집진의 분진제거효율을 60%[38]로 간주하였을 때에 2중 방진망의 이론적 분진제거율은 $(0.6 + 0.4 \times 0.6) \times 100\%$ 로서 84%로 나타났다. 따라서 P1에서 분진제어는 성공적이거나, 그 외의 추가적인 악취제어가 필요하였다. 한편 무창형 계사 P2에서는 암모니아 제거효율이 약 80%의 악취제거장치와 PM₁₀의 약 50~80%의 제거효율을 갖는 분진제거장치의 구비가 필요하였다. 단일 방진망의 여과집진법을 사용하는 P2의 악취제거효율은 30%[38]이었고, 분진제거율은 60%[38]이었다. 따라서 P2에서 분진제어는 다소 부족하고, 악취제어가 절대적으로 필요하여 우선적으로 이중 방진망 설치 및 기타 추가적 악취 및 분진 방지장치의 설치가 요구되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 무창형 계사 P1 및 P2의 방진망 구조물(chamber)로부터 오염원 배출의 특성을 부피오염원으로서의 CALPUFF 모델링 또는 점오염원으로서의 최종 CALPUFF 모델링으로 구현하였다. 실제 오염원이 배출되는 무창형 계사의 방진망 구조물은, 악취 및 분진이 네 방향으로 누출되는 부피오염원의 정의와 일치함에도 불구하고 오염원이 운동량을 가지고 배출되는 무창형 계사의 방진망 구조물에서의 오염원 거동은, 운동량 없이 확산에 의하여 오염원이 배출되는 부피오염원으로서 CALPUFF 모델링 거동과 운동량을 가지고 오염원이 배출되는 점오염원으로서의 최종 CALPUFF 모델링 거동의 사이의 값으로 간주되었다. 부피오염원을 적용한 CALPUFF 모델링을 수행한 경우에서 방지시설의 요구제거효율은, 점오염원을 적용한 CALPUFF 모델링을 수행한 경우와 비교하였을 때에 P1의 경우에는 상호간에 유사하였으나, P2와 P3에서 암모니아와 PM10의 경우에 더 높게 나타났다. 그럼에도 불구하고 민원 해결을 위한 안전한 접근방법으로서 부피오염원으로서 CALPUFF 모델링을 선정하였다. 이에 따라서 본 연구에서는 암모니아, 황화수소, PM_{2.5} 및 PM₁₀와 같은 오염원배출에 대하여 무창형 계사 P1 및 P2에 요구되는 정량적 방지수준을 제시하였다. P1의 경우에는 분진제어는 성공적이거나, 그 외의 추가적인 악취제어가 필요하였다. 또한 P2에서 분진제어는 다소 부족하고, 악취제어가 절대적으로 필요하여 우선적으로 이중 방진망 설치 및 기타 추가적 악취 및 분진 방지장치의 설치가 요구되었다.

감 사

이 논문은 2016년도 대구대학교 학술연구비지원(혹은 일부지원)에 의한 논문임.

사용기호

A	: rear area of a dust-proof screen chamber [m ²]
B	: side area of a dust-proof screen chamber [m ²]
C	: roof area of a dust-proof screen chamber [m ²]
C _s	: ground-level concentration [g/m ³]
d	: diameter of a stack as a point source [m]
d _a	: distance from the puff center to the receptor in the along-wind direction [m]
d _c	: distance from the puff center to the receptor in the cross-wind direction [m]
f(t, t ₀)	: Scaling factor
g	: vertical term of the Gaussian equation [m]
H _e	: effective height above the ground of the puff center [m]
h	: mixed-layer height [m]
Q	: total flow rate of emitting gas by fans equipped at the rear wall of a enclosed poultry farm [m ³ /s]
Q _p	: pollutant mass in the puff [g]
t	: Averaging time of interest [min]
t ₀	: Averaging time consistent with the dispersion rates used to obtain the mean concentration [min]
U	: linear velocity of emitting gas through four planes of a dust-proof screen chamber [m/s]
u	: required linear velocity of ventilated air in the center of a enclosed windless poultry farm [m/s]
u _y ^M	: model-linear velocity of emitting gas at the stack as a point source in the finally-adjusted CALPUFF modeling [m/s]
α	: total area of windows [m ²]
σ _x	: standard deviation of the Gaussian distribution in the along-wind direction [m]
σ _y	: standard deviation of the Gaussian distribution in the cross-wind direction [m]
σ _z	: standard deviation of the Gaussian distribution in the vertical direction [m]

Reference

1. Bokowa, A. H., "Review of Odour Legislation," *Chemical Engineering Transactions*, **23**, 31-36(2010).
2. Nicell, J. A., "Assessment and Regulation of Odour Impacts," *Atmos. Environ.*, **43**, 196-206(2009).
3. Okutani, F., Hirose, K., Kobayashi, T., Kaba, H. and Hyodo, M., "Evaluation of "Open Essence" Odor Identification Test Card by Application to Healthy Volunteers," *Auris Nasus Larynx.*, **40**, 76-80(2013).
4. Smeets, M. A. M., Bulsing, P. J., Rooden, S. V., Steinmann, R., Ru, J. A. D., Ogink, N. W. M., Thriel, C. V. and Dalton, P. H., "Odor

- and Irritation Thresholds for Ammonia: A Comparison Between Static and Dynamic Olfactometry,' *Chem Senses.*, **32**, 11-20(2007).
5. Hartung, J. and Phillips, V. R., "Control of Gaseous Emissions from Livestock Buildings and Manure Stores,' *J. Agric. Eng. Res.*, **57**, 173-189(1994).
 6. Gustafsson, G., "Factors Affecting the Release and Concentration of Dust in Pig House,' *J. Agric. Eng. Res.*, **74**, 379-390(1999).
 7. Ramiro, G. M. and Danny, L. R., "Compatibility of Ammonia Suppressants Used in Poultry Litter with Mushroom Compost Preparation and Production,' *Bioresour. Technol.*, **97**(14), 1679-1686(2006).
 8. Kim, K. Y. and Choi, H. L., "On Site Evaluation on Odor Emissions from Livestock Manure Composting Facilities in the Han River Basin,' *J. Anim. Sci. & Technol.*, **43**(6), 1005-1018(2001).
 9. Kazutaka, K., Takashi, O., Mitihiro, Y., Akane, K., Takako, N., Sigenori, M. and Tomoko, N., "Emissions of Malodorous Compounds and Greenhouse Gases from Composting Swine Feces,' *Bioresour. Technol.*, **56**, 265-271(1996).
 10. Jester, R. C., P. E. and Malone, G. W., "Respiratory Health on the Poultry Farm, National Ag Safety Database (NASD), <http://www.cdc.gov/nasd/docs/d000101-d000200/d000146/d000146.html>.
 11. Roumeliotis, T. S. and Van Heyst, B. J., "Summary of Ammonia and Particulate Matter Emission Factors for Poultry Operations,' *J. Appl. Poult. Res.*, **17**, 305-314(2008).
 12. Navaratnasamy, M. and Feddes, J. J. R., "Odor Emissions from Poultry Manure/litter and Barns,' PIC Project No 155, Poultry industry council, Alberta, Canada(2004).
 13. Lacey, R. E., Redwine, J. S. and Panell, Jr. C. B., "Particulate Matter and Ammonia Emission Factors for Tunnel-ventilated Broiler Production Houses in the Southern U.S.,' *Trans. ASAE*, **46**(4), 1203-1214(2003).
 14. Lim, T.-T., Heber, A. J., Ni, J.-Q., Gallien, J. X. and Xin, H., "Air Quality Measurements at a Laying Hen House: Particulate Matter Concentrations and Emissions,' in H. Keener(Ed.), *Air Pollution from Agricultural Operations III*(ASAE Publication Number 701P1403), ASAE conference, October, Research Triangle Park, North Carolina(2003).
 15. Gay, S. W., Schmidt, D. R., Clanton, C. J., Janni, K. A., Jacobson, L. D. and Weisberg, S., "Odor, Total Reduced Sulfur, and Ammonia Emissions from Animal Housing Facilities and Manure Storage Units in Minnesota,' *Applied Engineering in Agriculture*, 347-360(2003).
 16. Hinz, T. and Linke, S., "A Comprehensive Experimental Study of Aerial Pollutants in and Emissions from Livestock Buildings: Part 2. Results,' *J. Agric. Eng. Res.*, **70**, 119-129(1998).
 17. Koerkamp, P. W. G., Merz, J. H. M., Uenk, G. H., Phillips, V. R., Holden, M. R., Sneath, R. W., Short, J. I., White, R. P., Hartung, J., Seedorf, J., Schroder, M., Linkert, K. H., Pederson, S., Takai, H., Johnsen, J. O. and Wathes, C. M., "Concentrations and Emissions of Ammonia in Livestock Buildings in Northern Europe,' *J. Agric. Eng. Res.*, **70**, 79-95(1998).
 18. Wathes, C. M., Holden, M. R., Sneath, R. W., White, R. P. and Phillips, V. R., "Concentrations and Emissions Rates of Aerial Ammonia, Nitrous Oxide, Methane, Carbon Oxide, Dust and Endo-toxin in UK Broiler and Layer Houses,' *British Poultry Science*, **38**, 14-28(1997).
 19. Hadlocon, L. S., Zhao, L. Y., Bohrer, G., Kenny, W., Garrity S. R., Wang, J., Wyslouzil, B. and Upadhyay, "Modeling of Particulate Matter Dispersion from a Poultry Facility Using AERMOD,' *Journal of the Air & Waste Management Association*, **65**(2), 206-217(2015).
 20. Kim, K. Y., "On-site Investigation of Distribution Characteristics of Odorous Compounds Emitted from Poultry Buildings,' *Korean Journal of Odor Research and Engineering*, **11**(3), 105-111(2012).
 21. Kim, K. Y., Choi, J.-H. and Kim, D., "Temporal Distribution Characteristics of Indoor Concentrations of Odorous Compounds According to Poultry Buildings,' *J. Korean Soc. Indoor Environ.*, **10**(2), 69-82(2013).
 22. Kuroda, K., Osada, T. and Yonaga, M., "Emission of Malodorous Compounds and Greenhouse Gases from Composting Swine Feces,' *Bioresour. Technol.*, **56**, 265-271(1995).
 23. Kulik, A., "Europe Cultivates Organics Treatment,' *World Wastes*, **39**, 37-40(1996).
 24. Laupsa, H., Denby, B., Larsen, S. and Schaug, J., "Source Apportionment of Particulate Matter (PM_{2.5}) in An Urban Area Using Dispersion, Receptor and Inverse Modeling,' *Atmos. Environ.*, **43**, 4733-4744(2009).
 25. Caputo, M., Giménez, M. and Schlamp, M., "Intercomparison of Dispersion Models,' *Atmos. Environ.*, **37**, 2435-2449(2003).
 26. Homes, N. S. and Morawska, L., "A Review of Dispersion Modeling and Its Application to the Dispersion of Particles: An Overview of Different Dispersion Models Available,' *Atmos. Environ.*, **40**, 5902-5928(2006).
 27. Vieira de Melo, A. M., Santos, J. M., Mavroidis, I. and Reis, Jr., N. C., "Modeling of Odour Dispersion Around a Pig Farm Building Complex Using AERMOD and CALPUFF: Comparison with Wind Tunnel Results,' *Build. Environ.*, **56**, 8-20(2012).
 28. Ranzato, L., Barausse, A., Mantovani, A., Pittarello, A., Benzo, M. and Palmeri, L., "A Comparison of Methods for the Assessment of Odor Impacts on Air Quality: Field Inspection (VDI 3940) and the Air Dispersion Model CALPUFF,' *Atmospheric Environment*, **61**, 570-579(2012).
 29. Ghannam, K. and Fadel, M. E., "A Framework for Emissions Source Apportionment in Industrial Areas: MM5/CALPUFF in a Near-Field Application,' *Journal of the Air and Waste Management Association*, **63**(2), 190-204(2013).
 30. Jeong, S. J., "CALPUFF and AERMOD Dispersion Models for Estimating Odor Emissions From Industrial Complex area Sources,' *Asian Journal of Atmospheric Environment*, **5**(1), 1-7(2011).
 31. Lee, E. J. and Lim, K.-H., "Odor Modeling of Acetaldehyde in Gumi National Industrial Complex,' *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(1), 22-35(2016).
 32. Lee, E. J., Khan, M. and Lim, K.-H., "Odor Modeling of Trimethyl Amine in Gumi National Industrial Complex,' *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(2), 187-199(2016).
 33. Scire, J. S., Strimaitis, D. G. and Yamartino, R. J., *A User's guide for the CALPUFF dispersion model*, version 5, Earth Tech, Inc., Concord, MA(2000).
 34. Wang, L., Parker, D. B., Parnell, C. B., Lacey, E. E. and Shaw, B. W., "Comparison of CALPUFF and ISCST3 Models for Predicting Downward Odor and Source Emission Rates,' *Atmospheric Environment*, **40**, 4663-4669(2006).
 35. Turner, D. B., *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, U.S. EPA Office of Air Programs Publication No. AP-26, Research

- Triangle Park, North Carolina(1970).
36. Air dispersion modeling guidelines for Arizona air quality permits, Air quality division of Arizona department of environmental quality, Arizona(2013).
 37. Hwangbo, J., Song, J. I., Cho, K. H., Chung, B. S., Lee, B. S., Nam, B. S., Chung, C. S. and Chung, I. B., "Environmental Efficiency Analysis of an Enclosed Experimental Broiler House," *J. Anim. Sci. & Technol. (Kor.)*, **44**(4), 475-482(2002).
 38. Mark Dunlop, "Control of Odor and Dust from Chicken Sheds: Review of "add-on" Technologies," RIRDC Publication No.09/034, RIRDC Project No. DAQ-341A, Mar. 2009.