

밀폐형 돈사 작업장의 전체 환기율이 가스상 오염물질 노출 농도 변화에 미치는 영향

김기연¹ · 서성철² · 최정학^{3,*}

¹부산가톨릭대학교 산업보건학과, ²고려대학교 알레르기면역연구소, ³부산가톨릭대학교 환경공학과

Effect of General Ventilation Rate on Concentrations of Gaseous Pollutants Emitted from Enclosed Pig Building

Ki Youn Kim¹ · Sung Chul Seo² · Jeong-Hak Choi^{3,*}

¹Department of Industrial Health, Catholic University of Pusan

²The Environmental Health Center for Asthma, Korea University

³Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan

ABSTRACT

Objectives: The principal aim of this study was to compare the concentrations of gaseous pollutants emitted in enclosed pig buildings between different rates of general ventilation and determine the variations in the patterns of gaseous pollutants as affected by ventilation rate.

Materials and Methods: The experiment was performed in the growing/finishing room(20.0m×12.0m×3.0m) of a pig confinement building located on the experimental farm of Seoul National University. The conditions of the general ventilation rate for three treatments were 30%(4.12m³ s⁻¹), 50%(6.87m³ s⁻¹) and 70%(9.61m³ s⁻¹). The data presented in the study were collected over a total of 45 days, 15 days for each of the three treatments from March to May 2011. A total of six air samplings were taken at 1.5m above the floor of the pig building. The environmental agents measured in the pig building were ammonia, hydrogen sulfide and odor concentration index for gaseous pollutants with temperature and hydrogen sulfide for thermal factors.

Results: There were significant differences in the ammonia and odor concentration index in the pig building among the three general ventilation rate conditions(p<0.05), whereas hydrogen sulfide did not show a significant difference among three conditions of general ventilation rate(p>0.05). As the general ventilation rate applied to the pig building increases, it appears that all the indoor environmental agents measured in this study simultaneously decrease.

Conclusions: The gaseous pollutants significantly affected by the general ventilation rate in pig building were ammonia and odor concentration index(p<0.05). However, it was found that hydrogen sulfide and thermal factors, temperature and relative humidity were not influenced significantly by variation in the general ventilation rate.

Key words : ammonia, hydrogen sulfide, odor concentration index, pig building, ventilation rate

I. 서 론

밀폐형 돈사 작업장의 최소 환기율의 적용은 주로 돼지 건강 보호라는 측면에서 적정 온열 환경 유지를

위해 적용되어 왔다(Hellickson & Walker, 1983). 최소 환기율 이하의 수준으로 운영되는 경우는 양돈업자들이 경제적 측면에서 돈사 작업장 안의 온도를 증가시켜 돼지의 사료 소비를 감소시키거나 실내 온도 유지에 쓰이

*Corresponding author: Jeong-Hak Choi, Tel: 82-51-510-0637, E-mail: jhchoi@cup.ac.kr

Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, 57 Oryundae-ro, Geumjeong-gu, Busan 609-757

Received: January 8, 2014, Revised: February 7, 2014, Accepted: February 17, 2014

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.

는 연료 사용을 절약하기 위해서 행해진다. 하지만, 환기율의 감소는 결국 돈사 작업장에 다양한 공기 오염물질을 외부로 배출시키지 못하고 내부에 축적시키는 결과를 초래하게 된다(Zhang et al., 1998).

양돈 작업장에서 발생하는 실내 공기 오염물질은 크게 가스상 오염물질, 입자상 오염물질, 생물학상 오염물질로 구분할 수 있다(Kim et al., 2005). 이 중 가스상 오염물질은 돈사 작업장 내 돼지, 사료, 분뇨에서 유래되는데, 이 중 분뇨에서 발생하는 양이 가장 높은 부분을 차지한다(Leneman et al., 1998; Ni et al., 1999; Chang et al., 2001; Demmers et al., 2003). 분뇨의 생물학적 분해를 통해 생성되는 가스상 물질의 대부분은 암모니아, 황화수소, 메탄, 이산화탄소, 수증기 형태로 나타나게 되며, 미량 가스상 물질로는 아민, 아미드, 알콜, 알데히드, 케톤, 멸캅탄, 디설파이드, 카르보닐 설파이드, 지방산 등이 있다. 미량 가스상 물질들이 비록 적은 농도로 돈사 작업장 안에 방출되지만 그것들은 작업자의 호흡기계 질환 발생과 돼지의 생산성을 제한하는 요인으로 작용한다.

돈사 작업장 안에서 발생하는 가스상 오염물질을 외부로 배출하기 위해 특정한 공기 전환율이 적용되면 돼지 수의 상관없이 환기율의 독립적 적용이 가능하다고 오래전부터 제안되어 왔다(Andersen et al., 1978). 그러나 현재까지 돈사 작업장 안에서 발생하는 가스상 오염물질과 환기율 간의 명확한 연관성에 대한 연구 자료는 거의 보고된 바 없다. 또한 돈사 작업장 안의 실내 공기질 평가와 더불어 작업자가 공기 오염물질에 노출되는 반응 기작을 규명한다는 측면에서 환기율의 변화에 따른 가스상 오염물질의 발생 농도를 조사하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구의 목적은 각기 다르게 설정된 전체 환기율 적용 시 발생하는 가스상 오염물질의 실내농도를 비교하여 환기율에 의해 영향을 받는 가스상 오염물질의 변화량 양상을 평가함과 동시에 돈사 작업장에 적용되는 전체 환기율과 가스상 오염물질 발생 농도간의 통계적 연관성을 규명하는 데 있다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구 대상

본 연구는 S대학교 농업생명과학대학 실험목장에

위치하고 있는 밀폐형 육성/비육돈사 작업장(20 m×12 m×3 m)에서 수행되었다. 돈사 작업장 안의 면적은 45 m²로 바닥은 부분 슬랫(Slat)으로 이루어져 있으며 밑에 1.3m 깊이의 분뇨 피트(Pit)가 위치해 있었다. 폭 1.1 m 중앙 복도를 기점으로 양쪽에 철근 구조로 이루어진 펜(2 m×5 m×1 m)이 9개씩 설치되었다. 돈사 작업장 안의 측벽과 천장은 0.8 mm 철근 플레이트와 50 mm 스티로폼 재질로 절연화하였다(Figure 1). 실험기간 중 사료와 음용수는 각각 자동 공급장치를 통해 자유채식 토록 관리하였다.

실험 초기에는 피트 내 분뇨를 깨끗이 제거한 상황에서 시작하여 실험 기간 중 2주마다 한 번씩 피트에 축적된 분뇨를 외부 저장조로 배출시켰다. 환기 형태는 전체 환기의 음압 배기 시스템으로 측벽에 설치된 슬롯 형태의 공기 유입구를 통해 신선한 공기가 유입된 후 반대편 측벽에 설치된 5개의 직경 1.2 m의 배기팬에 의해 외부로 배출되는 방식이었다(Figure 1).

각 펜에는 평균 체중 50-75 kg의 교잡종(Landrace×Yorkshire×Duroc) 육성 비육돈 10마리를 무작위 방식으로 총 18개 펜에 대해 총 180마리를 입식시켰다. 사료는 자동 공급 장치에 의해, 음용수는 자유 급이 장치

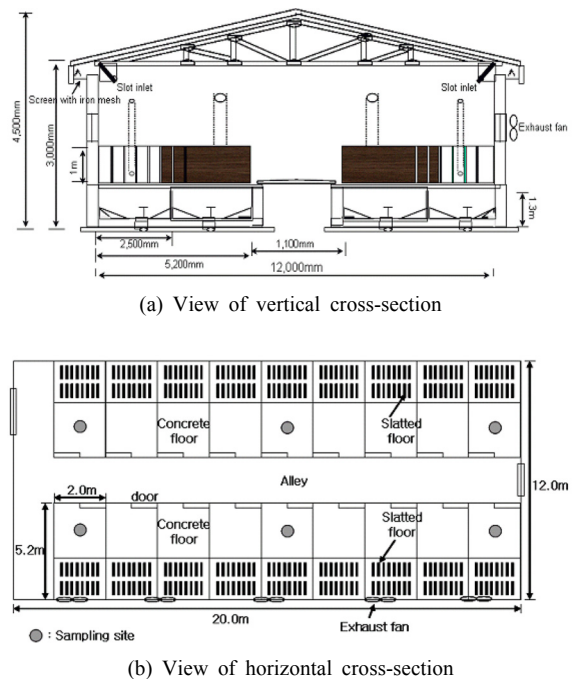


Figure 1. The layout of experimental growing/finishing pig housing

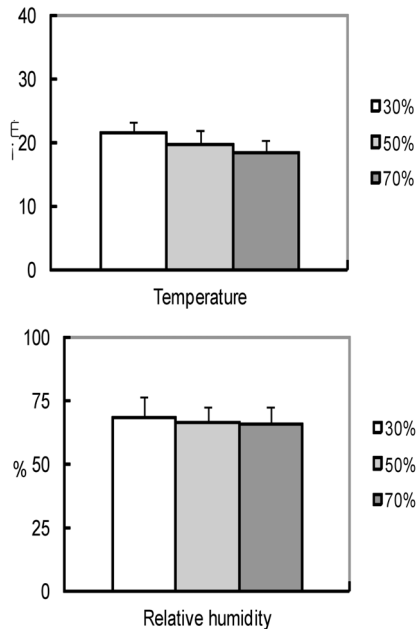


Figure 2. Gradient of thermal factors in enclosed pig building according to ventilation rate

에 의해 제공되었다.

2. 측정 방법

2011년 3~5월 기간 중 3가지 전체 환기율 조건을 설정하여 각 처리구별로 15일, 총 45일 동안의 측정 데이터를 수집하였다. Figure 1에서 보이는 바와 같이 작업자의 호흡 위치에 해당되는 바닥으로부터 1.2 m 위치에 총 6개의 측정 지점을 선정하여 지역 시료를 채취하였고, 시료 채취 시 돼지의 접근을 방지하기 위해 철근 받침대로 공기 시료 샘플러를 보호하였다.

측정 대상 가스상 오염물질로 돈사 작업장에서 가장 많이 발생하는 것으로 알려져 있는 암모니아와 황화수소를 선정하였고, 복합 악취도를 평가하기 위해 악취 농도 지수(Odor concentration index)를 동시에 측정하였다. 측정 시간대는 오전 9시에서 오후 5시로 시료 분석 특성 및 발생 농도 상황에 따라 30분~1시간 동안 공기 시료를 포집하는 방식으로 3.5시간 간격으로 총 3번 채취하여 분석한 평균값을 대표값으로 하였다. 현장 평가된 돈사 작업장 전체 환기율의 3가지 조건은 돈사 작업장에 적용되는 적정 환기율을 100%로 기준하여 이와 대비 시 30%(4.12 m³ s⁻¹), 50%(6.87 m³ s⁻¹), 70%(9.61 m³ s⁻¹)로 설정하였

고, 각 처리 조건을 동일시키기 위해 매일 번갈아 가며 실험하였다.

미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety & Health, NIOSH) method NO.?? (NIOSH, 2010)에 근거하여 암모니아는 임핀저를 이용한 황산 흡수액, 황화수소는 Charcoal tube를 통해 포집한 후 Ion chromatography(761 Compact IC, Metrohm Inc., Switzerland)에 의해 분석하였다. 악취 농도 지수(Odor concentration index)는 휴대용 디지털 직독식 측정기(XP-329, Cosmos Corp., Japan)에 의해 측정되었다. 동시에 돈사 작업장 실내 온열 인자인 온도와 상대습도는 Hybrid recorder(MV 200, Yokogawa Inc., Japan)를 통한 온라인 센서 측정 방식으로 10분 간격으로 실시간 모니터링 되었다.

3. 자료 분석

SPSS(Version, IBM, USA)프로그램을 이용하여 각 환기율 처리 조건에 대한 가스상 오염물질간의 농도 차이를 분산분석을 통해 통계 처리하였다. 또한 환기율 변화에 따른 각 가스상 오염물질의 농도 변화 관계를 규명하기 위해 각 항목별로 직선회귀분석을 실시하였다.

III. 결 과

1. 환기율이 돈사 작업장 내 가스상 오염물질 노출농도에 미치는 영향

Figure 2에서 제시하는 바와 같이 돈사 작업장에 설정된 전체 환기율 30%, 50%, 70% 조건 시에 내부 평균 온도와 상대습도는 각각 21.4(±1.8)°C와 68.2(±8.3)%, 19.5(±2.4)°C와 66.3(±5.8)%, 18.2(±2.1)°C와 65.7(±6.8)%인 것으로 조사되었다. 하지만 온열 인자인 온도와 상대습도는 각 환기율 처리구 간에 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다.

Figure 3은 돈사 작업장에 설정된 전체 환기율 30%, 50%, 70% 조건 시에 악취농도, 암모니아, 황화수소의 실내 농도 분포 양상을 보여주고 있다. 측정 결과, 전체 환기율 30% 조건 시에 악취농도, 암모니아, 황화수소의 평균 농도는 609(±213), 18.3(±3.47) ppm, 132.7(±15.3) ppb, 50% 조건의 경우 447(±186) ppm, 9.3(±2.2) ppm, 118.2(±23.2) ppb, 70% 조건의

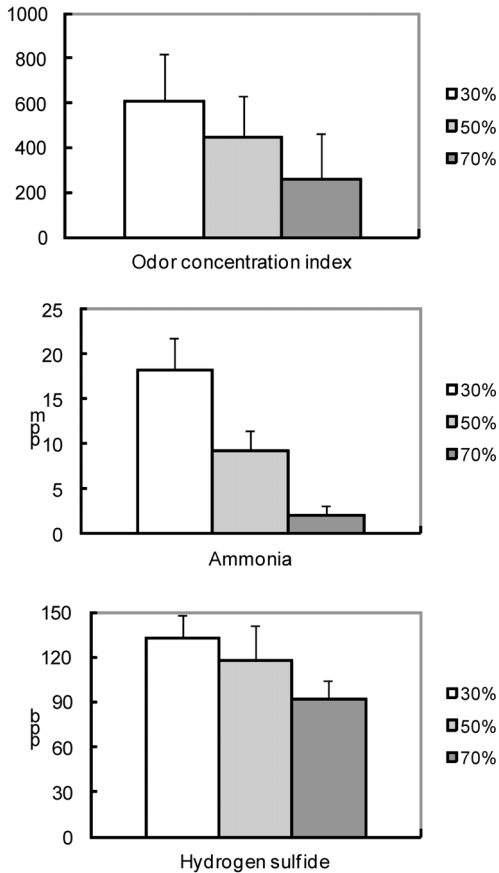


Figure 3. Gradient of gaseous compounds in enclosed pig building according to ventilation rate

경우 259(±207), 2.1(±1.1) ppm, 92.37(±11.8) ppb인 것으로 조사되었다. 통계 분석 결과, 악취 농도와 암모니아의 경우 환기율 설정 조건에 따른 농도 차이가 통계적으로 유의한 것으로 나타났으나($p<0.05$), 황화수소 농도의 경우 환기율 조건에 따른 유의한

차이가 없는 것으로 조사되었다.

2. 돈사 작업장 환기율과 가스상 오염물질과의 상관관계

Table 1은 돈사 작업장에서 측정된 개별 실내 환경 요인들을 종속 변수로 설정하고, 이들 분포에 영향을 줄 것으로 예측되는 전체 환기율의 설정된 조건을 독립 변수로 하여 일차 직선 회귀 모델을 적용한 결과를 보여주고 있다. 통계 분석 결과, 돈사 작업장에 적용되는 전체 환기율이 증가함에 따라 측정대상 모든 실내 환경 요인들이 동시에 낮아지는 경향을 보였다. 하지만 본 종속 변수들과 환기율 설정 조건 간에 통계적으로 유의한 직선 회귀 관계가 성립된 요인은 악취 농도와 암모니아인 것으로 분석되었다($p<0.05$). 반면 온도, 상대습도, 황화수소는 환기율 설정 조건과 통계적으로 유의하지 않은 직선 회귀 관계가 성립되는 것으로 나타났다.

IV. 고 찰

현장 실험 결과, 전반적으로 가스상 오염물질인 악취농도, 암모니아, 황화수소는 돈사 작업장 전체 환기율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이는 것으로 조사되었다. 이러한 측정 결과가 도출된 이유는 밀폐형 돈사 작업장 내 적용되는 전체 환기율과 가스상 오염물질 농도 간에 역의 관계는 환기율 증가에 의한 내부 공기 희석에 의한 결과라 할 수 있다(Ni et al., 2002). 즉, 돈사 작업장 내 발생하는 가스상 오염물질들은 일반적으로 환기 패턴에 의해 형성된 공기 흐름에 따라 이동된다는 것을 단적으로 보여주고 있는 결과라 할 수 있다. 또한 돈사 작업장 내 온도(Curtis et

Table 1. Linear regression between environmental parameters and ventilation rate in the enclosed pig building

Model equation: $Y = a + bX_1$				
Dependent variables(Y)	Intercept		Ventilation rate(X_1)	
	a	P-value	b	P-value
Temperature	12.14	$p<0.01$	-0.048	0.197
Relative humidity	68.06	$p<0.01$	-0.139	0.238
Odor concentration index	3.145	$p<0.05$	-0.193	$p<0.05$
Ammonia	812.35	$p<0.01$	-9.033	$p<0.01$
Hydrogen sulfide	17.28	0.169	-0.168	0.114

al., 1975), 상대습도(Bundy, 1984), 돼지의 행동성(Gustafsson, 1999)과 같은 실내 환경 요인들이 가스상 오염물질의 실외 배출 양상에 영향을 준다는 점도 본 결과 해석 시 고려되어야 할 것이다.

본 연구 결과에서 특이할만한 사항은 황화수소는 돈사 작업장 환기율이 증가함에 따라 저감되는 비율이 통계적으로 유의하지 않게 측정되었다는 점이다. 이는 두 가스상 물질의 비중이 암모니아(0.587)보다 황화수소(1.189)가 상대적으로 높기 때문에 돈사 작업장 내 상층 부분보다는 하층 부분에 존재하여 상층 측벽 배기 시스템으로 환기가 되고 있는 본 돈사 작업장의 구조적 특징상 환기에 의한 공기 흐름 양상이 바닥까지 완벽하게 적용되지 못했기 때문이라 사료된다. 또한 돈사 작업장 바닥이 슬랫(Slat)으로 이루어져 바닥 밑에 설치된 피트(Pit) 표면적을 완전히 차단하지 못하고 있기 때문에 환기에 의한 원활한 공기 유동 양상이 유도되지 못했기 때문이라 판단된다.

암모니아와 황화수소 등의 돈사 작업장 내 발생되는 가스상 오염물질의 주요 발생원은 돼지가 배설한 분뇨에서 대부분 기인된다(Aarnink et al., 1996). 암모니아의 경우 돼지가 배설한 분뇨 내 유기성 질소가 미생물의 분해에 의해 무기화되면서 암모늄 이온(NH_4^+)이 pH 조건에 따라 공기 중으로 암모니아 형태로 방출된다(Swierstra et al., 1995). 황화수소의 경우 주로 돼지 분뇨가 혐기성 미생물에 의해 분해되어 방출되는 휘발성 물질로 돈사 작업장의 주요 가스상 유해인자로 알려져 있다(Gay et al., 2003). 기존 발표된 연구 결과들에 근거하면 돈사 내부에서 발생하는 가스상 오염물질을 효과적으로 제어하기 위한 최적의 방안은 분뇨 처리 방식이나 돈사 작업장 구조 형태가 아닌 적정 환기 시스템의 적용이라고 보고되고 있다(Kim et al., 2005). 따라서 향후 돈사 작업장의 가스상 오염물질 노출에 따른 작업자의 호흡기계 질환 및 돼지의 안전한 생산성 확보를 위해서는 다른 일반 사업장의 경우와 동일하게 돈사 작업장의 적정 실내공기질 맞춤형 환기시스템의 운용 방안이 시급히 설정되어야 하며, 이를 위해서는 지금보다 심화적인 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

V. 결 론

돈사 작업장 내 설정된 3가지 환기율 조건에 대해

평가대상 가스상 오염물질 중 악취농도와 암모니아는 통계적으로 유의한 차이가 나타났으나($p>0.05$), 황화수소의 경우 유의한 차이가 나타나지 않는 것으로 분석되었다. 돈사 작업장에 적용되는 전체 환기율이 증가함에 따라 측정대상 모든 실내 환경 요인들이 동시에 낮아지는 경향을 보였으나, 통계적으로 유의한 변수들은 악취농도와 암모니아인 것으로 조사되었다($p<0.05$). 돈사 작업장 내 온도, 상대습도, 황화수소는 전체 환기율 변화에 통계적으로 유의한 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

감사의 말씀

이 논문은 2012년도 부산가톨릭대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음.

References

- Aarnink AJA, Van der Berg AJ, Keen A, Hoeksman P, Verstegen MWA. Effect of slatted floor area on ammonia emission and on the excretory and lying behavior of growing pigs. *J Agric Eng Res* 1996; 64:299-310
- Anderson JF, Bates DW, Jordan KA. Medical and engineering factors relating calf health as influenced by the environment. *Trans ASAE* 1978;21:1169-1174
- Bundy DS. Rate of dust decay as affected by relative humidity, ionization and air movement. *Trans ASAE* 1984;27:865-870
- Chang CW, Chung H, Huang CF, Su HJ. Exposure assessment to airborne endotoxin, dust, ammonia, hydrogen sulfide and carbon dioxide in open style swine houses. *Ann Occup Hyg* 2001;45:457-465
- Curtis ES, Drummond JG, Kelley KW, Grunloh DJ, Meares VJ, Norton HW, Jensen AH. Diurnal and annual fluctuations of aerial bacterial and dust levels in enclosed swine houses. *J Anim Sci* 1975;41:1502-1511
- Demmers TGM, Wathes CM, Richards PA, Teer N, Taylor LL, Bland V, Goodman J, Armstrong D, Chennells D, Done SH, Hartung J. A facility for controlled exposure of pigs to airborne dusts and gases. *Biosys Eng* 2003;84:217 - 230
- Gay SW, Schmidt DR, Clanton CJ, Janni KA, Jacobson LD, Weisberg S. Odor, total reduced sulfur, and ammonia emissions from animal housing facilities

- and manure storage units in Minnesota. *Appl Eng Agric* 2003;19:347-360
- Gustafsson G. Factors affecting the release and concentration of dust in pig houses. *J Agric Eng Res* 1999;74:379-390
- Hellickson MA, Walker JN. Ventilation of agricultural structures. ASAE, St. Joseph, Michigan 1983;49085
- Kim KY, Ko HJ, Lee KJ, Park JB, Kim CN. Temporal and spatial distributions of aerial contaminants in an enclosed pig building in winter. *Environ Res* 2005;99:150-157
- Leneman HAD, Oudendag KW, Van der Hoek PHM. Focus on emission factors: A sensitivity analysis of ammonia emission modeling in the Netherlands. *Environ Pollut* 1998;102:205 - 210
- Ni JQ, Heber AJ, Diehl CA, Lim TT, Duggirala RK, Haymore BL. Summertime concentrations and emissions of hydrogen sulfide at a mechanically ventilated swine finishing building. *Trans ASAE* 2002;45:193-199
- Ni JQ, Vinckier C, Coenegrachts J, Hendriks J. Effect of manure on ammonia emission from a fattening pig house with partly slatted floor. *Livest Prod Sci* 1999;59:25 - 31
- NIOSH. Sampling and characterization of bioaerosols. In: *Manual of Analytical Method*. Paul AJ, Schafer MP. (eds), 2010, Cincinnati, Ohio, USA
- Swierstra D, Smits MCJ, Kroodsma W. Ammonia emission from cubicle houses for cattle with solid floors. *J Agric Eng Res* 1995;62:127-132
- Zhang Y, Tanaka A, Dosman JA, Senthilselvan A, Barber EM, Kirychuk SP, Holfeld LE, Hurst TS. Acute respiratory responses of human subjects to air quality in a swine building. *J Agric Eng Res* 1998; 70:367-373