

밀폐형 돈사작업장내 공기중 중금속 오염물질의 정량화

김기연 · 고한중 · 옥행지 · 김치년^{1)‡}

서울대학교 농생명공학부 · 연세대학교 의과대학 산업보건연구소¹⁾

Quantification of airborne heavy metals in enclosed pig building

Ki-Youn Kim · Han-Jong Ko · Haeng-Ji Ok · Chi-Nyon Kim^{1)‡}

*School of Agricultural Biotechnology, Seoul National University
Institute for Occupational Health, Yonsei University College of medicine¹⁾*

Airborne heavy metals in enclosed pig building were analyzed to evaluate concentrations of them according to season and sampling location. Regardless of season and sampling location, the content of Pb was highest, followed by an order of Zn, Cu, As, Cr, Ni, and that of Cd was lowest in enclosed pig building. Concentrations of airborne heavy metals in enclosed pig building were significantly higher in winter than summer($p<0.05$). On the other hand, concentrations of airborne heavy metals on breathing zone of pig were higher than breathing zone of worker but no significant difference in the concentrations of airborne heavy metals

was found between the breathing zone of pig and that of worker($p>0.05$). Values of all the heavy metals investigated in this study did not exceed the exposure limit value(TLV-TWA). Difference in concentrations of airborne heavy metals between summer and winter could be explained by effect of air dilution formed by application of different ventilation rate. The main resources of airborne heavy metals released in enclosed pig building are assumed to be feedstuff and manure which contained appreciable heavy metals.

Key Words: Heavy metal, Total dust, Ventillation, Pig building

I. 서 론

작업장 실내 공기에 대한 사회적 인식이 날로 높아짐에 따라 축사내 작업 환경에 대한 관심과 환경 규제 또한 예전보다 한층 강화되고 있다. 축사는 크게 우사, 돈사, 계사로 구분되는데 돈사와 계사의 경우 내부 온습도 제어를 통한 돼지와

닭의 증체량 향상과 이에 소요되는 노동력 절감을 위해 현재 기계적 환기를 통한 밀폐형 축사의 보급이 지배적이다. 하지만, 우리나라 대부분의 밀폐형 축사 작업장들은 여타 다른 작업장에 비해 경제적으로 열악하고 이를 극복하기 위한 하나의 방편으로 환기 시스템 운용에 소요되는 비용을 최대한 줄이고 있는 실정이다.

이로 인해 부적절한 환기량 적용으로 밀폐형 축사 작업장내 환경은 작업자와 사육되고 있는 동물에게 건강상의 위해요소를 심각한 수준으로 제공하고 있다.

밀폐형 축사내 공기 오염물질은 크게 유해가스, 분진, 부유 미생물로 구분되며(Hellickson & Walker, 1983; Dewi et al., 1994; Reynolds et al., 1996), 동물들에게 제공되는 사료와 그들이 배설하는 분뇨가 주요 발생 원인으로 보고 되고 있다(Clark et al., 1983; Aarnink et al., 1999). 축사내

접수일 : 2004년 3월 12일, 채택일 : 2004년 4월 19일

‡ 교신저자 : 김치년(서울특별시 서대문구 신촌동 134번지, 연세대학교 산업보건연구소

Tel : 02-361-5375, E-mail : cnkim@yumc.yonsei.ac.kr)

공기 오염물질들에 장시간 노출된 작업자는 폐렴, 천식, 기관지염, 비염 등과 같은 주로 호흡기 계통의 질병이 유발된다(Bruce and Sommer, 1987; Crook et al., 1991; Olson and Bark, 1996).

이러한 밀폐형 축사내 공기 오염물질의 정량화(Wathes et al., 1998; Chang et al., 2001; Gay et al., 2003)와 발생 기작 및 원인(Attwood et al., 1987; Gustafsson, 1999; Duchaine et al., 2000)에 대한 국외의 연구는 상당 부분 수행되고 있으며, 최근 들어 국내에서도 이 분야에 대한 관심이 대두되기 시작했다(김기연과 김치년, 2003). 하지만, 공기 중 중금속 농도에 대한 현장 조사가 밀폐형 계사에서만 연구되었고(용준환 등, 1994), 밀폐형 돈사 작업장을 대상으로 한 연구는 아직 국내외적으로 보고된 바 없었다. 돼지의 성장촉진이나 사료효율 개선 등의 여러 가지 목적으로 사료에 첨가되는 Cu, Zn, As, Mn, Fe 및 Se 같은 중금속의 미량원소들이 사료 관리법에서 제시하는 기준량보다 초과 투입되어 시중에 판매되는 것이 사실이며, 전량 동물체 내에서 이용되지 않고 일부 분뇨로 배출된다(Sims & Wolf, 1994). 특히, 돈분뇨의 경우 Zn과 Cu 같은 특정 중금속이 퇴비의 원료로 이용할 수 없는 도시 고형 폐기물이나 하수오수에 포함된 함량보다 높다는 보고(Mullins et al., 1982; Williams et al., 1984)에 근거를 둔다면 사료와 분뇨로 인한 밀폐형 돈사 작업장의 실내 중금속 농도가 상당 수준에 이를 것이라 판단된다.

따라서 본 연구는 밀폐형 돈사 작업장 내 공기 중 중금속 물질의 농도 범위를 계절별로 정량화하고 작업자와 돼지의 호흡기 위치에 따른 각각의 중금속 물질들의 분포 양상을 분석하기 위한 목적으로 수행되었다.

II. 실험대상 및 방법

1. 실험대상

서울대학교 농업생명과학대학 부속 동물목장에 위치한 동물환경연구실의 밀폐형 실험돈사를 대상으로 동절기(2003년 1월에서 2월)와 하절기(2003년 7월에서 8월) 기간 동안 각 절기별로 3~5일 간격으로 15일 동안 시료를 채취하여 총 30일 동안 실험을 수행하였다. 본 연구에 이용된 밀폐형 육성·비육돈사의 제원은 20m(W)×12m(L)로 중앙 복도를 중심으로 좌우에 5.4m(W)×2m(L)×1m(H)의 돈방이 각 10개씩 총 20개가 설치되었다. 각 돈방에는 평균체중 45kg인 삼원교잡종(Landrace×Yorkshire×Duroc) 육성돈 10두씩 총 200두를 완전임의 배치법으로 입식하였다. 급이사료는 육성돈 사료(S사)를 자동 급이기를 통해 급여하였고, 음용수는 니플(nipple)을 설치하여 자유롭게 음수토록 하였다. 분뇨는 슬러리 방식으로 처리하였고, 실험기간 동안 각 돈방에 보온등(620W)을 하나씩 설치하여 돈사내의 적온도를 유지하였다. 환기방식은 돈사측

벽 입기구를 통해 들어온 외부공기가 배플(baffle)을 통해 내부로 유입되는 입기시스템과 반대편 측벽에 설치된 5개의 팬(0.6m×0.6m)이 덕트로 연결되어 내부 공기가 외부로 배출되는 음압방식의 배기시스템 형태로 구성되었다. 실험기간 동안 MWPS-8(1988)에서 제시한 돼지 사육단계별 환기율의 적정범위에 따라 내부 온도 및 습도가 센서에 의해 적정 수준으로 자동 제어되는 전체환기 방식이 적용되었다. 돈사에 대한 그 밖의 제원사항은 Table 1과 같다.

2. 시료 분석

1) 공기 중 중금속 및 총 분진 측정

시료 포집은 육성·비육돈사의 복도 중앙과 양측의 우리(pen) 중앙에 바닥으로부터 30cm와 150cm 위치에서 시료 채취가 가능한 받침대를 자체 제작하여 설치, 총 6 지점에서 수행되었다(Figure 1). 각 시료 채취 위치에 2 l/min으로 유량이 설정된 air sampler(No. 800519, Gilian)를 설치하여 장시간 노출 기준에 근거, 총 8시간(AM 9:00 ~ PM 5:00) 동안 포집하였다. 총 분진은 PVC여과지를 사용하여 중량 분석하였다. 중금속은 MCE 여과지로 채취하여 전처리를 거친 후 Cu, Zn, Cr, Cd, Pb, As 및 Ni을 대상으로 유도결합 플라즈마 발광광도기(Shimadzu Model ICPS-1000IV, Japan)로 분석하였다(농업과학기술원, 1999).

Table 1. The composition material and specifications of the enclosed growing/finishing pig building

Location	Composition
Roof material	Side steel plate 0.8mm + Urethane 100mm
Outside wall	Side steel plate 0.8mm + Styrofoam 100mm
Inside wall(upper)	Side steel plate 0.8mm + Styrofoam 50mm
Inside wall(lower)	Concrete 200mm
Ceiling	Side steel plate 0.8mm + Styrofoam 50mm
Characteristics	Specification
Pit depth(cm)	45 ~ 60
Pit capacity(m ³)	80.4
Floor material	Concrete slat
Fan type	Sirocco fan
R value(m ² ·°C/W)	19.8/12.8
- Roof/Wall	

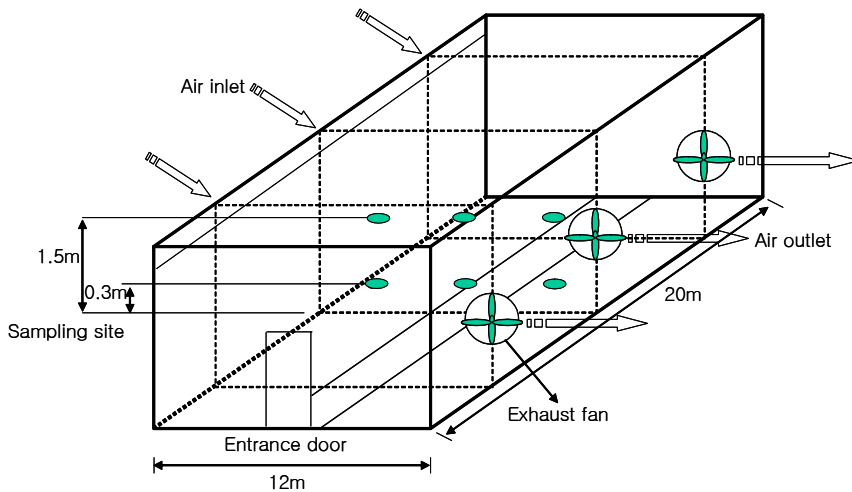


Fig 1. Sampling site in the enclosed growing/finishing pig building

2) 사료 및 돈분 내의 중금속 함량분석

사료(bulk sample)의 시료 채취는 실험이 진행되는 날에 투입된 사료를 대상으로 했으며, 돈분 고형물의 채취는 공기 시료가 포집되는 지점의 바닥에 집적된 것을 일정량 채취하였다. 사료 내의 총 중금속 함량을 분석하기 위해서는 중금속 항목에 따라 건식법(dry ashing)과 습식법(wet ashing)을 구분하여 적용하였다(축산기술 연구소, 2001). 한편, 돈분은 폐기물이 아닌 부산물비료의 원료로 포함되어 있으므로 부산물 비료인 퇴비의 중금속 함량 분석과 동일한 절차로 수행되었다.

3) 온도 및 습도 측정

돈사 내부의 온도 및 상대습도는 시료가 채취되는 6지점에 센서를 설치 후 자동 데이터 logging 시스템(Squirrel Model

1201 Grant, England)에 연결하여 8시간 동안 30분 마다 측정하여 그 평균값을 대표값으로 하였다.

4) 통계 분석

본 실험에서 얻어진 분석 결과는 SAS (1996) package program을 이용하여 계절 및 위치간 차이를 t-test를 통해 통계적 유의성을 검정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 계절에 따른 밀폐형 돈사내 공기 중 중금속 농도의 변화

계절에 따른 밀폐형 돈사내 공기 중 중금속 농도의 변화 양상을 살펴보면, 계절

에 상관없이 Pb가 평균 $19.59\mu\text{g}/\text{m}^3$ (하절기), $22.22\mu\text{g}/\text{m}^3$ (동절기)으로 가장 높은 농도를 보였고 다음으로 Zn, Cu, As, Cr, Ni 순이었으며 Cd가 평균 $0.56\mu\text{g}/\text{m}^3$ (하절기), $0.61\mu\text{g}/\text{m}^3$ (동절기)으로 가장 낮은 농도로 측정되었다(Table 2). 분석 결과 하절기보다 동절기시 모두 높은 것으로 나타났고, Cu, Zn, As, Pb의 경우 통계적 유의적 차이가 있는 것으로 입증되었다($p<0.05$). 돈사작업장에서 발생된 공기 중 중금속의 모든 측정결과는 직업적 노출기준(노동부, 2002; ACGIH, 2003) 이하로 평가되었다.

계절에 따른 밀폐형 돈사내 중금속 농도의 차이가 나타난 것은 총 분진의 농도 차이에 기인하는 것으로 판단된다. Table 2에 나타난 바와 같이 총 분진의 농도도 중금속 분석 결과와 동일하게 하절기보다 동절기에 높은 것으로 나타났으며($p<0.05$), 돈사내 분진 발생의 주요 인자는 중금속이 포함되어있는 사료와 돈분이다. 사료내 상당한 양의 중금속 물질들이 포함되어 있는 이유는 돼지의 증체량과 사료 효율개선 목적으로 인한 것이며, 돈분 내 중금속 함유 원인은 사료에 첨가된 특정 광물질이 요구량을 훨씬 초과된 약리적 수준(pharmacological level)으로 급여되어 체내에서 이용되지 못하고 상당 양 분으로 배설되었기 때문이다. Table 3에서 제시하는 바와 같이 사료와 돈분에는 Zn과 Cu의 함량이 다른 중금속 물질에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났으며, Cd가 가장 낮은 것으로 분석되었는데,

Table 2. Airborne heavy metal contents in the enclosed pig building by season

		Physical factors		Total dust (mg/m ³)	Airborne heavy metals(μg/m ³)						
		Temp.	R.H.		Cr	Cu	Zn	As	Pb	Cd	Ni
Summer	Average	24.5 [*]	72.9 [*]	2.54 [*]	1.84	8.06 [*]	17.31 [*]	3.97 [*]	19.59 [*]	0.14	0.56
	S.E.	3.9	8.5	0.81	1.01	6.32	10.16	6.03	9.12	0.34	1.10
	Max.	27.3	88.1	3.75	5.07	13.09	33.43	14.93	27.24	1.64	4.48
	Min.	21.2	59.8	1.28	0.05	2.14	8.06	0.08	9.37	0.00	0.00
Winter	Average	17.2 [*]	79.2 [*]	2.91 [*]	2.03	9.45 [*]	20.16 [*]	4.32 [*]	22.22 [*]	0.23	0.61
	S.E.	4.8	5.4	0.62	1.12	5.74	6.28	4.68	8.26	0.36	1.83
	Max.	20.3	89.3	3.75	5.84	14.28	32.18	19.83	31.02	1.68	4.28
	Min.	14.7	68.8	2.18	0.15	2.58	11.17	0.13	10.28	0.00	0.00

 * : $p<0.05$

이는 돈사내 공기 중 중금속 물질들의 농도 분포 양상을 설명해 주는 근거라 추정된다. 하지만 본 연구에서 Pb가 사료와 돈분내 낮은 함량에도 불구하고 돈사 내에서 다른 중금속 물질들에 비해 가장 높게 검출되고 변종각(1989)이 보고한 도시 대기 중 Pb 농도 비율에 비해 매우 높게 나타난 원인은 향후 연구해야 할 과제라 사료된다.

또한 분진 발생 양상을 결정하는 돈사내 물리적 요인, 즉 온도와 상대습도도 계절에 따른 밀폐형 돈사내 중금속 물질들의 함량 차이에 영향을 주는 것으로 판단된다. Table 2에서 제시하는 바와 같이 하절기 실험 기간 동안 밀폐형 돈사내의 온도 및 상대습도는 평균 24.5℃와 72.9%, 동절기의 경우 평균 17.2℃, 79.2%로 조사되어 내부 온도는 하절기가 동절기보다 약 7℃ 정도 높고, 내부 상대습도는 동절기가 하절기보다 약 6% 정도 높은 것으로 분석되었다($p < 0.05$). 하절기와 동절기시 돈사 내부의 평균 온도와 상대습도에 차이를 보인 것은 외부 온도 및 상대습도 변화에 따라 각기 다른 환기율이 적용되었기 때문이며, 이러한 돈사내 물리적 요인의 변화는 돈사내 중금속 함량의 원인인 분진 발

생에 영향을 미치게 된다. 하지만 돈사내 온도 및 상대습도의 변화에 따른 분진 발생과의 역학적 관계에 대해 현재까지 여러 연구자들간의 의견이 서로 일치하지 않고 있다(Feddes et al., 1983; Hilliger et al., 1984; Nilson, 1984; Heber et al., 1988). 이러한 내용을 종합적으로 고찰한 Dawson(1990)에 의하면 실질적으로 돈사내 분진 농도의 감소는 환기에 의한 공기 희석 효과에 의한 것이며, 온도와 상대습도는 돼지의 행동성과 돈사 내부의 환경을 변이시켜 분진 발생에 영향을 주는 간접적 인자라 보고하고 있다. 따라서 본 연구 결과는 돈사 내부의 적정 온도 유지 측면에서 하절기보다는 동절기에 환기에 의한 희석 효과가 상대적으로 낮아 총 분진과 이에 포함된 중금속의 돈사내 농도가 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다.

2. 측정위치에 따른 밀폐형 돈사내 공기 중 중금속 농도의 변화

돈사내 측정위치에 따른 밀폐형 돈사내 공기 중 중금속 농도의 변화 양상을 살펴 보면, 계절에 따른 분석 결과와 마찬가지로

로 Pb가 평균 $17.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (150cm), $20.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (30cm)으로 가장 높은 농도를 보였고 다음으로 Zn, Cu, As, Cr, Ni 순이었으며 Cd가 평균 $0.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (150cm), $0.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (30cm)으로 가장 낮은 농도로 조사되었다(Table 4). 작업자의 호흡기 위치인 150cm에서 측정된 7가지 중금속 물질들의 돈사내 공기 중 농도는 작업장내 8시간 노출기준인 TLV-TWA의 노출기준(노동부, 2002; ACGIH, 2003)을 초과하지 않는 것으로 나타났으나, 용준환 등(1994)이 보고한 밀폐형 계사내 중금속 농도와 비교시 Ni를 제외하고는 모두 높은 것으로 밝혀졌다. 또한 모든 중금속 물질들에 대해 150cm보다 돼지의 호흡기 위치인 30cm에서 측정된 분석값이 상대적으로 더 높은 것으로 나타났으나, 통계적 유의성은 없었다($p > 0.05$).

이는 총 분진의 농도 분포 측면으로 해석이 가능하다. 돼지의 호흡기 위치보다는 작업자의 호흡기 위치의 총 분진의 농도가 낮게 분포되어 있어 중금속의 농도가 상대적으로 낮게 평가된 것으로 사료된다. 일반적으로 돈사내 분진의 분포 양상은 하부에서 상부로 높아갈수록 농도가 낮아지는 것으로 보고되고 있으며(Barber

Table 3. Heavy metal contents of pig feedstuff and manures¹⁾

(Unit : mg/kg)

Type	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Ni
Feedstuff	5.39±0.51	60.55±14.60	66.56±32.48	1.76±0.66	0.11±0.09	1.12±0.50	0.84±0.13
Manure	7.50±0.83	351.09±35.44	298.96±34.26	3.54±1.27	0.17±0.08	1.08±0.24	6.78±0.77

1) Dry matter based

Data : Mean ± Standard deviation

Table 4. Airborne Heavy metal contents in the enclosed pig building by location

		Physical factors		Total dust (mg/m ³)	Airborne heavy metals($\mu\text{g}/\text{m}^3$)						
		Temp.	R.H.		Cr	Cu	Zn	As	Pb	Cd	Ni
Upper location (150cm)	Average	20.5	74.1	2.56	1.87	8.62	16.38	3.93	17.57	0.10	0.42
	S.E.	3.1	6.4	0.83	0.82	6.61	8.26	4.28	8.37	0.25	0.88
	Max.	27.1	86.3	3.77	6.14	15.28	29.48	21.08	24.15	1.42	3.83
	Min.	2.9	5.3	0.61	0.08	3.14	8.57	1.20	9.25	0.00	0.00
Lower location (30cm)	Average	20.6	75.0	2.87	2.15	9.87	17.86	4.32	20.29	0.23	0.44
	S.E.	2.4	6.1	0.82	1.13	5.62	9.99	6.62	8.79	0.39	0.64
	Max.	28.6	91.3	3.83	5.48	16.09	33.43	25.14	29.42	1.82	3.42
	Min.	2.4	5.6	0.64	1.22	3.19	7.33	1.86	10.28	0.00	0.00

* : $p < 0.05$

et al., 1991; 김기연, 2004), 이러한 사실은 본 연구 결과를 잘 뒷받침해 주고 있다. 돈사내와 같이 밀폐된 장소에서의 분진은 가스상 물질과는 달리 공기 중에 오랜 기간 동안 부유하고 있는 것이 아니라, Stoke 법칙에 따라 중력에 의해 다시 바닥으로 침전되기 때문에 일반적인 전체환기의 운용만으로는 효율적으로 제어할 수 없다. 따라서 작업자의 건강관리를 위하여 밀폐형 돈사내 발생하는 분진과 중금속 물질들의 저감을 위해서는 새로운 개념의 환기시스템 개발과 보건관리 대책이 요구된다.

IV. 결 론

밀폐형 돈사작업장내 공기 중 중금속 농도는 계절과 위치에 상관없이 Pb가 가장 높은 농도로 분포하였고 다음으로 Zn, Cu, As, Cr, Ni 순이었으며 Cd가 가장 낮은 농도를 나타냈다. 하절기보다는 동절기에 유의적으로 높았으며($p < 0.05$), 작업자의 호흡기 위치(150cm)보다는 돼지의 호흡기 위치(30cm)에서 높게 나타났으나 통계적 유의성은 없었다($p > 0.05$). 조사대상 7가지 중금속 물질 모두 작업장내 TWA의 허용기준을 초과하지 않았으며 계절에 따른 돈사내 중금속 농도의 차이는 각기 다른 환기율 적용에 의한 공기 희석 효과의 차이에 기인한 것으로 사료된다. 돈사내 공기 중 중금속 발생의 주요 원인은 상당한 양의 중금속 물질들을 포함하고 있는 사료와 돈분인 것으로 판단되었다.

REFERENCES

- 김기연. 2004. 돈사내 공기 오염물질의 정량화 및 처리 방법에 관한 연구. 서울대학교 박사학위 논문.
- 김기연, 김치년. 2003. 겨울철 밀폐형 돈사작업장에서 발생하는 실내공기 오염물질의 변동. 한국산업위생학회지. 13(3):191-197.
- 노동부. 화학물질 및 물리적 인자의 노출 기준. 노동부 고시 제 2002-8호, 2002 농업과학기술원. 1999. 친환경농업을 위한 가축분뇨 퇴비·액비 제조와 이용. 농촌진흥청. pp. 52 ~ 70.
- 변종각. 1989. 한강주변 대기중 중금속의 농도에 관한 연구. 연세대학교 산업대학원 석사학위 논문.
- 용준환, 김종오, 이인모. 1994. 국내 중계장의 공기중 호흡성 분진과 중금속 함량에 관한 연구. 한국수의공중보건학회지. 18(4):339-342.
- 축산기술연구소. 2001. 사료표준분석방법. 농촌진흥청. pp. 81-96.
- Aarmink, A. J. A., Roelofs, P. F. M. M., Ellen, H., and Gunnink, H. 1999. Dust sources in animal houses. Proceedings on dust control in animal production facilities, pp. 34-40. Department of Agricultural Engineering, Danish Institute of Agricultural Sciences, Horsens, Denmark.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. 2003
- Attwood, P., Ruigewaard, R., Versloot, P., De Wit, R., Heederik, D., and Boleij, J. S. M. 1987. A study of the relationship between airborne contaminants and environment factors in Dutch swine confinement buildings. American Industrial Hygiene Association Journal. 48(8):745-751.
- Barber, E. M., Dawson, J. R., Battams, V. A., and Nicol, R. A. C. 1991. Spatial variability of airborne and settled dust in a piggery. Journal of Agricultural Engineering Research. 50:107-127.
- Bruce, J. M., and Sommer, M. 1987. Environmental aspects of respiratory disease in intensive pig and poultry houses, Including the implications for human health. Proceedings EC Meeting Aberdeen, 29-30 October 1986. EC Commission Publications, Brussels.
- Clark, S., Rylander, R., and Larsson, L. 1983. Airborne bacteria, endotoxin and fungi in dust in poultry and swine confinement buildings. American Industrial Hygiene Association Journal. 44:537-541.
- Crook, B., Robertson, J. F., Travers, G. S., Botheroyd, E. M., Lacey, J., and Topping, M. D. 1991. Airborne dust, ammonia, microorganisms, and antigens in pig confinement houses and the respiratory health of exposed farm workers. American Industrial Hygiene Association Journal. 52:271-279.
- Dawson, J. R. 1990. Minimizing dust in livestock buildings: possible alternatives to mechanical separation. Journal of Agricultural Engineering Research. 47:235-248.
- Dewi, I. A., Axford, R. F. E., Marai, I. F. M., and Omed, H. M. 1994. Pollution in livestock production systems. CAB International.
- Duchaine, C., Grimard, Y., and Cormier, Y. 2000. Influence of building maintenance, environmental factors, and seasons on airborne contaminants of swine confinement buildings. American Industrial Hygiene Association Journal. 61(1):56-63.
- Feddes, J. J. R., Leonard, J. J., and McQuitty, J. B. 1983. The influence of selected management practices on heat, moisture and air quality in swine housing. Canadian Agricultural Engineering. 25:175-179.
- Gay, S. W., Schmidt, D. R., Clanton, C. J., Janni, K. A., Jacobson, L. D., and Weisberg, S. 2003. Odor, total reduced sulfur, and ammonia emissions from animal housing facilities and manure storage units in Minnesota. Applied Engineering in Agriculture. 19(3):347-360.
- Gustafsson, G. 1999. Factors affecting the

- release and concentration of dust in pig houses. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 74:379-390.
- Heber, A. J., Stroik, M., Nelssen, J. L., and Nichols, D. A. 1988. Influence of environmental factors on concentrations and inorganic content of aerial dust in swine finishing buildings. *Transactions of the ASAE*. 31(3):875-881.
- Hellickson, M. A. and Walker, J. N. 1983. Ventilation of agricultural structures. *ASAE*.
- Hilliger, Von H. G., Aengst, C., and Jellen, E. 1984. Gravimetric measurements of dust in pig and poultry houses. Paper presented at Symposium 'Dust in animal houses' held by International Society of Animal Hygiene, Hannover, March.
- Mullins, G. L., D. C. Martens, W. P. Miller, E. T. Kornegay and D. L. Hallock. 1982. Copper availability, form and mobility in soils from three-annual cooper-enriched hog manure applications. *Journal of Environmental Quality*. 11:316-320.
- MWPS. 1988. Swine housing and equipment handbook, MWPS-8. Midwest Plan Service. Iowa State University, Ames, IA 50011.
- Nilsson, C. 1984. Dust investigations in pig houses. Paper presented at Symposium 'Dust in animal houses' held by International Society of Animal Hygiene, Hannover, March.
- Olson, D. K., and Bark, S. M. 1996. Health hazards affecting the animal confinement farm worker. *American Association Occupational Health Nurse Journal*. 44:198-204.
- Reynolds, S. J., Donham, K. J., Whitten, P., Merchant, J. A., Burmeister, L. F., and Popendorf, W. J. 1996. Longitudinal evaluation of dose-response relationships for environmental exposures and pulmonary function in swine production workers. *American Journal of Industrial Medicine*. 29:33-40.
- SAS. 1996. User's Guide: Statistics, version 6.0 Editions, SAS Inst., Inc., Cary, NC. USA.
- Sims, J. T. and D. C. Wolf. 1994. Poultry manure management: Agricultural and environmental issues. *Adv. Agron.* 52:1-83.
- Wathes, C. M., Phillips, V. R., Holden, M. R., Sneath, R. W., Short, J. L., White, R. P., Hartung, J., Seedorf, J., Schroder, M., Linkert, K. H., Pederson, S., Takai, H., Johnsen, J. O., Koerkamp, P. W. G., Uenk, G. H., Metz, J. H. M., Hinz, T., Caspary, V., and Linke, S. 1998. Emissions of aerial pollutants in livestock buildings in Northern Europe: Overview of a multinational project. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 70:3-9.
- Williams, D. E., J. Vlamis, A. H. Pukite and J. E. Corey. 1984. Metal movement in sludge-treated soils after six years of sludge addition: 1. Cadmium, copper lead, and zinc. *Soil Science*. 137: 351-359.