



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

제주지역 양돈 악취물질의 분석 및
악취기여도 평가

濟州大學校 大學院

化 學 科

金 建 潤

2020年 8月

제주지역 양돈 악취물질의 분석 및 악취기여도 평가

指導教授 金原亨

金建潤

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함

2020年 6月

金建潤의 理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

尹景燮



委員

任喜貞



委員

金原亨



濟州大學校 大學院

2020年 6月



Analysis of Odorous Compounds from Swine Facilities in Jeju Island and the Evaluation of their Odor Contributions

Geon-yoon Kim

(Supervised by professor Won-Hyung Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science

2020. 6.

This thesis has been examined and approved.

Kyung-Sup Yoon

Hee-Jung Im

Won-Hyung Kim

.....
Date

DEPARTMENT OF CHEMISTRY
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY



목 차

List of Tables	iv
List of Figures	vii
ABSTRACT	x
I. 서 론	1
II. 연구방법	4
1. 약취 시료 채취	
1.1 시료 채취	4
1.2 시료 채취 지점	8
1.3 시료 채취 장비	9
1.3.1 진공흡입상자	9
1.3.2 Low Volume Air Sampler	9
1.3.3 Mini Volume Air Sampler	9
1.4 약취 시료 측정 및 분석 장비	9
1.4.1 무취 공기 제조장치	9
1.4.2 UV-Visible Spectrophotometer	10
1.4.3 Gas Chromatograph	10
1.4.4 High Performance Liquid Chromatograph	10
1.4.5 Thermal desorber System	10
1.4.6 Headspace System	10
1.4.7 Solid Phase Micro Extraction (SPME) System	10
2. 약취 시료 측정 및 분석방법	
2.1 공기 희석 관능법	11
2.2 암모니아 채취 및 분석	12
2.3 트리메틸아민 채취 및 분석	13

2.4 황화합물 채취 및 분석	14
2.5 알데하이드화합물 채취 및 분석	15
2.6 휘발성 유기화합물 채취 및 분석	17
2.7 휘발성 저급지방산 채취 및 분석	18
2.8 페놀류, 인돌류 채취 및 분석	20
2.9 분석 데이터 신뢰도 평가	20
III. 결과 및 고찰	22
1. 복합악취결과	
2. 농장별 악취물질 농도	
2.1 암모니아 농도	25
2.2 트리메틸아민 농도	28
2.3 황화합물	30
2.3.1 황화수소 농도	31
2.3.2 메틸머캅탄 농도	33
2.3.3 황화이메틸 농도	34
2.3.4 이황화이메틸 농도	36
2.4 알데하이드화합물	37
2.4.1 아세트알데하이드 농도	38
2.4.2 프로피온알데하이드 농도	40
2.4.3 뷰틸알데하이드농도	42
2.4.4 <i>iso</i> -발레르알데하이드 농도	44
2.4.5 <i>n</i> -발레르알데하이드 농도	45
2.5 휘발성유기화합물	47
2.5.1 스타이렌 농도	48
2.5.2 톨루엔농도	50
2.5.3 자일렌 농도	52
2.5.4 메틸에틸케톤 농도	54
2.5.5 메틸 <i>iso</i> -뷰틸케톤 농도	56
2.5.6 뷰틸아세테이트 농도	58

2.5.7 <i>iso</i> -뷰틸알코올 농도	60
2.6 휘발성 저급지방산	62
2.6.1 프로피온산 농도	63
2.6.2 뷰티르산 농도	65
2.6.3 <i>iso</i> -발레르산 농도	67
2.6.4 <i>n</i> -발레르산 농도	69
2.7 페놀 및 인돌류	71
2.7.1 페놀 농도	72
2.7.2 <i>p</i> -크레졸 농도	74
2.7.3 인돌 농도	76
2.7.4 스카톨 농도	78
3. 악취 원인물질 기여도	80
IV. 결 론	99
V. 참고문헌	101

List of Tables

Table 1. Odor characteristics of major odorous substances.	5
Table 2. Threshold limit values (TLV) of 26 odorous substances.	6
Table 3. Limit values of odor emission standard of odorous compounds.	7
Table 4. Types of swine farms selected for the study.	8
Table 5. Limit values of emission standard of complex odor.	11
Table 6. Instrumental conditions for the analysis of trimethylamine.	14
Table 7. Instrumental conditions for the analysis of sulfur compounds.	15
Table 8. Instrumental conditions for the analysis of aldehyde compounds.	16
Table 9. Instrumental conditions for the analysis of volatile organic compounds.	18
Table 10. Instrumental conditions for the analysis of volatile fatty acids.	20
Table 11. Method detection limit (MDL) and coefficient of variation (CV) for the analysis of odorous compounds (n=7).	22
Table 12. Dilution ratios for the complex odor measurement at the boundary of four swine farms.	24
Table 13. Concentrations of ammonia for four swine farms.	27
Table 14. Concentrations of trimethylamine for four swine farms.	29
Table 15. Concentrations of hydrogen sulfide for four swine farms.	32
Table 16. Concentrations of methylmercaptan for four swine farms.	34
Table 17. Concentrations of dimethylsulfide for four swine farms.	35
Table 18. Concentrations of acetaldehyde for four swine farms.	39
Table 19. Concentrations of propionaldehyde for four swine farms.	41
Table 20. Concentrations of butyraldehyde for four swine farms.	43
Table 21. Concentrations of <i>iso</i> -valeraldehyde for four swine farms.	44
Table 22. Concentrations of <i>n</i> -valeraldehyde for four swine farms.	46

Table 23. Concentrations of Styrene for four swine farms.	49
Table 24. Concentrations of toluene for four swine farms.	51
Table 25. Concentrations of xylene for four swine farms.	53
Table 26. Concentrations of methyl ethyl ketone for four swine farms.	55
Table 27. Concentrations of methyl <i>iso</i> -butyl ketone for four swine farms.	57
Table 28. Concentrations of butyl acetate for four swine farms.	59
Table 29. Concentrations of <i>iso</i> -butyl alcohol for four swine farms.	61
Table 30. Concentrations of propionic acid for four swine farms.	64
Table 31. Concentrations of butyric acid for four swine farms.	66
Table 32. Concentrations of <i>iso</i> -valeric acid for four swine farms.	68
Table 33. Concentrations of <i>n</i> -valeric acid for four swine farms.	70
Table 34. Concentrations of phenol for four swine farms.	73
Table 35. Concentrations of <i>p</i> -cresol for four swine farms.	75
Table 36. Concentrations of indole for four swine farms.	77
Table 37. Concentrations of skatole for four swine farms.	79
Table 38. Odor quotient (OQ) and sum of odor quotient (SOQ) of odorous compounds in A farm.	87
Table 39. Odor contribution (%) of 26 odorous compounds in A farm.	88
Table 40. Odor quotient (OQ) and sum of odor quotient (SOQ) of odorous compounds in B farm.	89
Table 41. Odor contribution (%) of 26 odorous compounds in B farm.	90
Table 42. Odor quotient (OQ) and sum of odor quotient (SOQ) of odorous compounds in C farm.	91
Table 43. Odor contribution (%) of 26 odorous compounds in C farm.	92
Table 44. Odor quotient (OQ) and sum of odor quotient (SOQ) of odorous compounds in D farm.	93
Table 45. Odor contribution (%) of 26 odorous compounds in D farm.	94
Table 46. Odor quotient (OQ) and sum of odor quotient (SOQ) of odorous	

compounds in enclosed type.	95
Table 47. Odor contribution (%) of 26 odorous compounds in enclosed type.	96
Table 48. Odor quotient (OQ) and sum of odor quotient (SOQ) of odorous compounds in winch-curtain type.	97
Table 49. Odor contribution (%) of 26 odorous compounds in winch-curtain type.	98

List of Figures

Figure 1. Location of four swine farms for sampling odorous substances.	8
Figure 2. Experimental procedure for the ammonia analysis.	12
Figure 3. Gas Chromatograph coupled with Nitrogen Phosphorous Detector (NPD).	13
Figure 4. Gas Chromatograph coupled with Flame Photometric Detector (FPD).	15
Figure 5. High Performance Liquid Chromatograph coupled with Photodiode Array Detector.	16
Figure 6. Gas Chromatograph coupled with Mass Selective Detector.	17
Figure 7. Gas Chromatograph coupled with SPME (Solid Phase Micro Extraction) System.	19
Figure 8. Comparison of complex odors at the boundary of four swine farms.	24
Figure 9. Comparison of ammonia concentrations for four swine farms.	27
Figure 10. Comparison of trimethylamine concentrations for four swine farms.	29
Figure 11. Comparison of hydrogen sulfide concentrations for four swine farms.	32
Figure 12. Comparison of methylmercaptan concentrations for four swine farms.	34
Figure 13. Comparison of dimethylsulfide concentrations for four swine farms.	36
Figure 14. Comparison of acetaldehyde concentrations for four swine farms.	39

Figure 15. Comparison of propionaldehyde concentrations for four swine farms.	41
Figure 16. Comparison of butyraldehyde concentrations for four swine farms.	43
Figure 17. Comparison of <i>iso</i> -valeraldehyde concentrations for four swine farms.	45
Figure 18. Comparison of <i>n</i> -valeraldehyde concentrations for four swine farms.	47
Figure 19. Comparison of styrene concentrations for four swine farms.	49
Figure 20. Comparison of toluene concentrations for four swine farms.	51
Figure 21. Comparison of xylene concentrations for four swine farms.	53
Figure 22. Comparison of methyl ethyl ketone concentrations for four swine farms.	55
Figure 23. Comparison of methyl <i>iso</i> -butyl ketone concentrations for four swine farms.	57
Figure 24. Comparison of butyl acetate concentrations for four swine farms.	59
Figure 25. Comparison of <i>iso</i> -butyl alcohol concentrations for four swine farms.	61
Figure 26. Comparison of propionic acid concentrations for four swine farms.	64
Figure 27. Comparison of butyric acid concentrations for four swine farms.	66
Figure 28. Comparison of <i>iso</i> -valeric acid concentrations for four swine farms.	68
Figure 29. Comparison of <i>n</i> -valeric acid concentrations for four swine farms.	70
Figure 30. Comparison of phenol concentrations for four swine farms.	73
Figure 31. Comparison of <i>p</i> -cresol concentrations for four swine farms.	75

Figure 32. Comparison of indole concentrations for four swine farms.	77
Figure 33. Comparison of skatole concentrations for four swine farms.	79
Figure 34. Comparison of odor contributions by odorous compounds in four swine farms.	85
Figure 35. Comparison of odor contributions by odorous compounds in two type swine farms.	86

ABSTRACT

In this study, the complex odor, the 22 designated odorous compounds and 4 undesignated odorous compounds has been analyzed from four swine farms in Jeju Island, in order to investigate the emission characteristics and odor contribution by different ventilation types.

The complex odor and the volatile fatty acids were found to be higher than their emission standards at the boundary in four swine farms. However the sulfur compounds, nitrogen compounds, aldehyde compounds, and volatile organic compounds showed lower concentrations than the emission standards at the boundary. The concentrations of *p*-cresol and skatole were detected higher than the threshold limit value (TLV).

The values of the sum of odor quotient (SOQ) were the highest at the boundary in 'B farm'. In the boundary of all swine farms, the odor quotients (OQ) of the volatile fatty acids (butyric acid, *n*-valeric acid, *iso*-valeric acid, except propionic acid) were showed the highest values, but the phenols (phenol, *p*-cresol) and the indoles (indole, skatole) showed low OQ values. Also, the odor contribution of volatile fatty acids was found to be the highest as 89.3~96.6% at the boundaries in all farms. Consequently, the volatile fatty acids might be considered as the major causing compounds of odor complaints.

From the odor contribution comparison based on the swine types, the contribution of sulfur compounds was the highest in the range of 46.0~55.8% at the enclosed type swine facility. The odor contribution of volatile fatty acids was 44.9~56.5% at the winch-curtain type facility.

I. 서 론

악취는 암모니아, 황 화합물, 아민류 등 자극성이 있는 기체상 물질이 사람의 후각을 자극하여 혐오감과 불쾌감을 주는 냄새를 말한다(환경부, 2012). 악취 물질은 인체에 정서적, 생리적 스트레스를 유발시켜 두통, 메스꺼움, 호흡곤란, 식욕감퇴, 알레르기 현상 등의 심미적 환경공해 요인으로 작용한다(Yasuhara *et al.*, 1984). 또한 악취를 유발하는 물질의 종류가 다양하고 악취물질들의 복합적인 상호작용, 개인적인 후각 차이 때문에 악취 정도를 객관적으로 비교하는데 한계가 있다. 그리고 악취 발생량을 어느 정도 저감시키더라도 극미량만으로 취기를 유발시킬 수 있기 때문에 이에 대한 방지대책을 수립하는데 많은 어려움을 겪고 있다(윤병석 등, 2003).

양돈 악취는 주로 사료의 소화와 분뇨의 발효에 의해 발생한다. 양돈 사료의 주성분은 단백질, 지방, 탄수화물 등의 유기물질이다. 이 물질들은 동물의 소화기에서 분해되어 배설되는 과정에서 심한 악취물질을 만든다(이은영, 2008; 김기연 등, 2006). 또 분뇨는 분해되는 과정에서 미생물에 의한 혐기성 발효에 의해 악취물질을 발생시킨다(오상집, 1999; Mackie, 1994). 이렇게 발생한 악취물질은 168가지 정도가 알려져 있으며, 30여종이 주요 악취 원인물질로 알려져 있다. 이 중에는 황 화합물, 암모니아 및 휘발성 아민류, 휘발성 저급지방산류, 페놀류, 인돌류 등이 포함되어 있다(O'Neil *et al.*, 1992). 환경부에서는 황 화합물, 암모니아 및 휘발성 아민류, 휘발성 저급지방산류를 중심으로 악취물질을 지정하여 관리하고 있다. 그러나 해외에서는 이 외에도 페놀류와 인돌류를 주요 악취물질에 포함시키고 있다(Wright *et al.*, 2005; Zahng *et al.*, 2001; Hobbs *et al.*, 2000).

환경부에서는 악취물질들의 체계적인 관리를 위해 2005년 2월에 악취방지법을 제정하였다. 그리고 관리대상 악취물질을 지속적으로 확대하여 2010년 이후부터 22 종을 지정악취물질로 선정하여 기준에 따라 규제하고 있다. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 삶의 질 향상에 대한 욕구가 증가됨에 따라 악취를 심각한 대기오염 문제로 인식하는 주민들이 늘어나고 있다. 그리고 최근 악취 관련 민원도 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다(정승호 등, 2008). 악취물질에 대한 민원발생 추세를 보면 2010년에 7,247건이었던 것이 2017년에는 22,851건으로 크게 증가하였다. 이 중

축산시설 관련 민원은 6,112건으로 전체 민원 중 26.7%를 차지하여 축산시설이 악취 민원의 주요 원인으로 나타나고 있다(환경부, 2018).

2017년 국민신문고를 통해 접수된 축산시설 악취 민원 중에서 지속적으로 문제가 제기된 축산시설 595개를 대상으로 축종별로 비교한 결과를 보면, 이 중 양돈시설이 206곳으로 34.6%를 차지하고 있다(국민권익위원회, 2018; 환경부, 2016). 이처럼 양돈시설 악취 민원이 증가하는 원인은 양돈업의 발달로 시설의 대규모화, 농장이 기업화되면서 악취물질 발생이 증가하기 때문인 것으로 추정되고 있다(이은영 등, 2010; 임광희, 2018).

우리나라 양돈산업 현황을 보면, 돼지사육농가가 2004년 13,268 가구에서 2019년 12월 기준 6,133 가구로 46%가 감소하였다. 반면에 가구당 사육두수는 671두에서 1,839두로 274%나 증가한 것으로 나타나고 있다. 이러한 추세는 우리나라 양돈산업이 이러한 대규모화, 기업화, 전업화 형태로 전환되고 있음을 의미한다(통계청, 2020).

제주지역은 양돈시설과 축산폐기물 처리시설에서 발생한 악취물질 때문에 청정 대기질을 유지하는데 어려움을 겪고 있다. 특히 제주지역의 양돈분뇨는 가축분뇨의 대부분을 차지할 뿐만 아니라 대부분 한정된 공간에 밀집되어 있어서 악취 민원의 주요 원인이 되고 있다. 도내 악취 관련 민원은 2011년에 92건이었으나 2019년에는 1898건으로 급속하게 증가하는 추세를 보이고 있다(환경부, 2020).

위와 같은 악취 문제는 지역 주민들은 물론 제주도를 방문하는 관광객들에게 심미적으로 아주 나쁜 영향을 미치고 있고, 제주의 청정 이미지를 훼손시키고 있다(강진영, 2010; 오영숙 등, 2006). 이에 따라 제주도에서는 도내 양돈시설을 대상으로 악취물질을 집중적으로 관리하고 있다. 2018년 3월부터 전체 40%에 가까운 113개 농가를 악취관리지역으로 지정하여 악취 저감에 노력을 기울이고 있다. 하지만 아직까지 그 효과는 아주 미미한 실정이다(환경부, 2019).

우리나라 양돈장에서 채택하고 있는 축사형태는 외부와 차단된 밀폐형 돈사와 외부에 노출된 원치커튼형 돈사가 대부분이다. 또 분뇨 수거방식에 따라 분과 뇨가 혼합된 슬러리형, 분과 뇨를 분리하여 처리하는 스크레퍼형, 슬러리와 스크레퍼형이 혼합된 형태 등으로 구분된다. 이처럼 돈사형태와 분뇨 수거방식이 비교적 복잡한 구조이고, 악취성분의 발생량도 각 유형별로 다르게 나타나기 때문에 악취 저감방법을 확립하는 데

에는 많은 어려움이 따른다(송정민, 2013). 따라서 효율적인 악취저감을 위해서 축사형태와 분뇨수거방식에 따라 악취의 발생량을 상호 비교해 보는 것은 의미가 있다.

그리고 양돈시설에서 발생하는 고농도 악취물질은 주변 지역으로 확산되어 피해를 야기할 수 있기 때문에 돈사 내·외부에서 발생하는 악취에 대한 정량적인 분석이 필연적이다. 또한 양돈시설에서 발생하는 악취문제를 근본적으로 원인을 해결하기 위해서는 환경부 지정악취물질 뿐만 아니라 비지정악취물질인 폐놀류와 인돌류 물질을 포함하여 비교하는 것이 더 바람직해 보인다.

본 연구에서는 사육규모가 비슷한 제주지역 4개의 양돈장에서 악취 시료를 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 채취하여 복합악취, 환경부 지정악취물질 22종과 비지정악취물질 4종을 분석하였다. 그리고 그 결과로부터 제주지역 양돈장에서 발생하는 악취물질의 발생 특성과 양돈장 유형별 악취 기여도를 조사하였다. 또한 본 연구를 통하여 제주지역 양돈시설에서 배출하는 악취물질이 외부에 미치는 영향을 조사하였고, 이를 제주지역 양돈 악취 관리방안을 수립하는데 필요한 기초자료로 활용하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 악취 시료 채취

1.1 시료채취

시료채취는 복합악취와 지정악취물질 22종[(암모니아(NH₃), 트리메틸아민(TMA), 황화수소(H₂S), 메틸머캅탄(CH₃SH), 디메틸설파이드(DMS), 디메틸디설파이드(DMDS), 아세트알데하이드(ACHO), 프로피온알데하이드(PCHO), 뷰틸알데하이드(BCHO), *iso*-발레르알데하이드(*iso*-VCHO), *n*-발레르알데하이드(*n*-VCHO), 스타이렌(STR), 톨루엔(TOL), 자일렌(XYL), 메틸에틸케톤(MEK), 메틸-*iso*-뷰틸케톤(MIBK), 뷰틸아세테이트(BuAc), *iso*-뷰틸알코올(*iso*-BuAl), 프로피온산(PA), 뷰티르산(BA), *iso*-발레르산(*iso*-VA), *n*-발레르산(*n*-VA)]을 채취하였다. 그리고 비지정악취물질 페놀(PHE), *p*-크레졸(*p*-C), 인돌(IND), 스카톨(SKT) 성분을 추가로 채취하였다. 그리고 채취한 악취물질 26종에 대한 냄새 특징과 최소감지농도(Threshold limit value)를 Table 1과 2에 수록하였고, 이들 물질들에 대한 환경부 악취공정법 배출허용기준은 Table 3에 나타내었다(환경부, 2016).

Table 1. Odor characteristics of major odorous substances.

Substance	Odor characteristic
Ammonia (NH ₃)	sharp pungent
Trimethylamine [(CH ₃) ₃ N]	ammonical, fishy
Hydrogen sulfide (H ₂ S)	rotten eggs
Methyl mercaptan (CH ₃ SH)	decayed cabbage, sulfidy
Dimethyl sulfide [(CH ₃) ₂ S]	decayed vegetables
Dimethyl disulfide (CH ₃ SSCH ₃)	vegetable sulfide
Acetaldehyde (CH ₃ CHO)	putrid, garlic
Propionaldehyde (CH ₃ CH ₂ CHO)	pungent fruity
Butyraldehyde [CH ₃ (CH ₂) ₂ CHO]	irritant
<i>iso</i> -Valeraldehyde [(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CHO]	irritant
<i>n</i> -Valeraldehyde [CH ₃ (CH ₂) ₃ CHO]	irritant
Styrene (C ₆ H ₅ CH=CH ₂)	pungent
Toluene (C ₆ H ₅ CH ₃)	solvent, rubber
Xylene [C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂]	paint
Methyl ethyl ketone (CH ₃ COCH ₂ CH ₃)	sweat, benzene like
Methyl <i>iso</i> -butyl ketone [CH ₃ COCH ₂ CH(CH ₃) ₂]	minty
Butyl acetate [CH ₃ COO(CH ₂) ₃ CH ₃]	pungent thinner
<i>iso</i> -Butyl alcohol [(CH ₃) ₂ CHCH ₂ OH]	pungent thinner, irritant
Propionic acid (CH ₃ CH ₂ COOH)	irritant, slight must
Butyric acid [CH ₃ (CH ₂) ₂ COOH]	irritant, pungent
<i>iso</i> -Valeric acid [(CH ₃) ₂ CHCH ₂ COOH]	sweaty rancid, irritant
<i>n</i> -Valeric acid [CH ₃ (CH ₂) ₃ COOH]	wet shoes
Phenol (C ₆ H ₅ OH)	wet shoes, cheese
<i>p</i> -Cresol (CH ₃ C ₆ H ₄ OH)	sweet and tarry
Indole (C ₈ H ₇ N)	sweet and tarry
Skatole (CH ₃ C ₈ H ₇ N)	feces, jasmine like
	feces

Table 2. Threshold limit values (TLV) of 26 odorous substances.

Compounds	Substance	TLV (ppm)
Nitrogen compound	Ammonia	0.1
	Trimethylamine	0.000032
Sulfur compound	Hydrogen sulfide	0.00041
	Methyl mercaptan	0.00007
	Dimethyl sulfide	0.003
	Dimethyl disulfide	0.0022
Aldehyde compound	Acetaldehyde	0.0015
	Propionaldehyde	0.001
	Butyraldehyde	0.00067
	<i>iso</i> -Valeraldehyde	0.0001
	<i>n</i> -Valeraldehyde	0.00041
Volatile organic compound	Styrene	0.035
	Toluene	0.33
	Xylene	0.16 *
	Methyl ethyl ketone	0.44
	Methyl <i>iso</i> -butyl ketone	0.17
	Butyl acetate	0.016
	<i>iso</i> -Butyl alcohol	0.011
Volatile Fatty acid	Propionic acid	0.0057
	Butyric acid	0.00019
	<i>iso</i> -Valeric acid	0.000037
	<i>n</i> -Valeric acid	0.000078
Phenole compound	Phenol	0.00028
	<i>p</i> -Cresol	0.000054
Indole compound	Indole	0.0003
	Skatole	0.0000056

* - Xylene의 경우 *o*-, *m*-, *p*-값을 산술평균한 값

- *o*-Xylene : 0.38 ppm, *m*-Xylene : 0.041 ppm, *p*-Xylene : 0.058 ppm

Table 3. Limit values of odor emission standard of odorous compounds.

Substance	Concentration (ppm)		
	General standard		Strict standard (Industrial area)
	Residential area	Industrial area	
1 Ammonia	1	2	1 ~ 2
2 Trimethylamine	0.005	0.02	0.005 ~ 0.02
3 Hydrogen sulfide	0.02	0.06	0.02 ~ 0.06
4 Methyl mercaptan	0.002	0.004	0.002 ~ 0.004
5 Dimethyl sulfide	0.01	0.05	0.01 ~ 0.05
6 Dimethyl disulfide	0.009	0.03	0.009 ~ 0.03
7 Acetaldehyde	0.05	0.1	0.05 ~ 0.1
8 Propionaldehyde	0.05	0.1	0.05 ~ 0.1
9 Butyraldehyde	0.029	0.1	0.029 ~ 0.1
10 <i>iso</i> -Valeraldehyde	0.003	0.006	0.009 ~ 0.02
11 <i>n</i> -Valeraldehyde	0.009	0.02	0.003 ~ 0.006
12 Styrene	0.4	0.8	0.4 ~ 0.8
13 Toluene	10	30	10 ~ 30
14 Xylene	1	2	1 ~ 2
15 Methyl ethyl ketone	13	35	13 ~ 35
16 Methyl <i>iso</i> -butyl ketone	1	3	1 ~ 3
17 Butyl acetate	1	4	1 ~ 4
18 <i>iso</i> -Butyl alcohol	0.9	4	0.9 ~ 4
19 Propionic acid	0.03	0.07	0.03 ~ 0.07
20 Butyric acid	0.001	0.002	0.001 ~ 0.002
21 <i>iso</i> -Valeric acid	0.001	0.004	0.0009 ~ 0.002
22 <i>n</i> -Valeric acid	0.0009	0.002	0.001 ~ 0.004
23 Phenol	-	-	-
24 <i>p</i> -Cresol	-	-	-
25 Indole	-	-	-
26 Skatole	-	-	-

1.2 시료 채취 지점

시료채취는 제주지역에 사육규모가 비슷한 양돈장 4곳을 선정하였고, 이때 양돈장의 위치와 시설 제원은 Figure 1과 Table 4에 나타내었다.

돈사 내부의 시료채취는 육성돈사와 비육돈사 정중앙에서 채취하였고, 돈사 외부는 부지경계선에서 시료를 채취하였다. 채취기간은 2018년 11월부터 12월까지 총 3회에 걸쳐 진행하였고, 채취 시간은 대표성을 확보하기 위하여 동일한 시간대에 실시하였다.

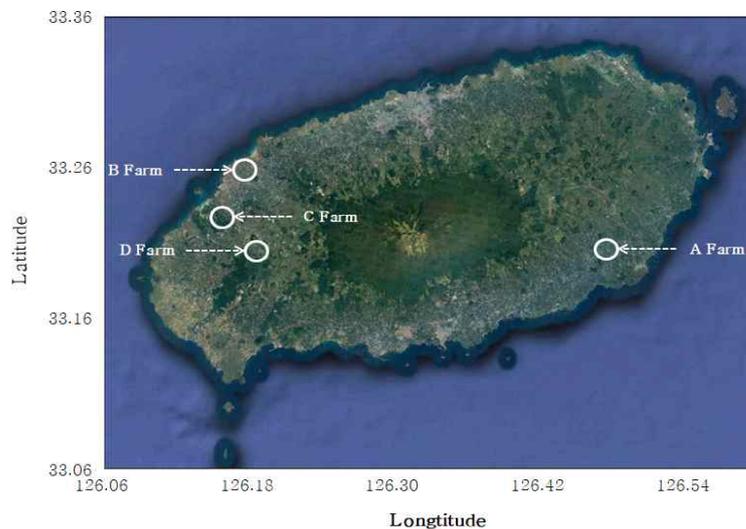


Figure 1. Location of four swine farms for sampling odorous substances.

Table 4. Types of swine farms selected for the study.

Pig Farm	Swine Farms Type	Manure Collection System
A Farm	Enclosed Ventilation and Slurry	Deep-pit (full slats)
B Farm	Enclosed Ventilation and Slurry	Deep-pit (partial slats)
C Farm	Winch-curtain and Slurry	Deep-pit (partial slats)
D Farm	Enclosed Ventilation and Slurry	Deep-pit (partial slats)

1.3 시료 채취 장비

1.3.1 진공흡입상자

복합악취와 황 화합물 시료는 진공흡입상자(Supelco, 10642, USA)를 사용하여 Polyester Aluminum Sampling Bag (BMS, 5 L, Japan)으로 채취하였다. 이 채취 장치는 시료가 Bag에 채워지면 자동으로 멈추도록 설치되어 있으며, 흡입 펌프 유속은 2 L/min이 되도록 조절하였다.

1.3.2 Low Volume Air Sampler

암모니아, 트리메틸아민, 휘발성 저급지방산 시료는 Low Volume Air Sampler (Sibata, KP-100, Japan)를 사용하여 채취하였다. 임핀저 (Sibata, SPC24, Japan)에 샘플러의 유속을 MFC (Mass Flow Controler)를 이용하여 10 L/min를 일정하게 유지하였고, 채취시간은 5 분으로 설정하였다.

1.3.3 Mini Volume Air Sampler

알데하이드 화합물 시료는 MFC가 달린 Mini Volume Air Sampler (Sibata, MP- Σ 100H, Japan)로 사용하여 흡입펌프 유속을 1.0 L/min로 조절하였고, 채취 시간은 10 분으로 설정하였다. 그리고 휘발성 유기화합물, 페놀류, 인돌류 성분들은 Mini Volume Air Sampler (Sibata, MP- Σ 100H, Japan)을 사용하였고, 이때 흡입 펌프 유속은 0.1 L/min로 10 분이 되도록 조절하였다.

1.4 악취 시료 측정 및 분석 장비

1.4.1 무취 공기 제조장치

복합악취는 공기희석관능법을 통해 측정하였다. 악취 희석을 위한 무취 공기는 악취공정시험법에 따라 초순수, 공병, 실리카겔, 활성탄, Air chamber로 구성된 장치에 실내공기를 40 L/min의 유량으로 통과시켜 제조하였다.

1.4.2 UV-Visible Spectrophotometer

암모니아 성분은 인도페놀법으로 분석하였고, 발색 시료용액의 흡광도는 UV-Visible Spectrophotometer (Biochrom, Libra-S22, UK)를 사용하여 640 nm 파장에서 측정하였다.

1.4.3 Gas Chromatograph

지정악취물질 중 황 화합물, 트리메틸아민, 휘발성 유기화합물, 휘발성 저급지방산들을 정량분석하기 위하여 각각 GC/FPD (Shimadzu, 2010 plus, Japan), GC/NPD (Shimadzu, GC-2030, Japan), GC/MSD (Shimadzu, GC-2010 plus, MS-TQ8040, Japan), GC/FID (Shimadzu, GC-2030, Japan)를 사용하였다.

1.4.4 High Performance Liquid Chromatograph

알데하이드 시료는 HPLC (Shimadzu, Nexera, Japan)를 사용하여 분석하였다. 이 때 검출기는 Photodiode Array Detector (Shimadzu, SPD-M40, Japan)를 사용하였고, 검출 파장은 360 nm이다. 또한 분리용 컬럼은 일본 시마즈사의 Shim-pack GIS C18를 사용하였다.

1.4.5 Thermal desorber System

Thermal desorber System을 사용하여 가스상 시료를 cold trap에서 극저온으로 응축 및 농축시킨 후, cold trap에 채취된 시료를 고온으로 가열하여 가스크로마토그래피프로 주입하였다.

1.4.6 Headspace System

용액흡수법으로 채취된 시료를 22 mL 바이알에 넣고, Headspace System (Perkin Elmer, TurboMatrix 40, USA)를 사용하여 교반 및 가열한 후 기화된 가스상 물질을 가스크로마토그래프로 주입시켰다.

1.4.7 Solid Phase Micro Extraction (SPME) System

채취된 시료를 22 mL 바이알에 넣고 incubator에서 교반 및 가열하였고, 가

열된 시료는 탄소 흡착제가 코팅된 SPME fiber에 흡착시켰다. 그리고 가스크로마토그래프의 주입구에서 SPME fiber를 삽입하여 분석시료를 탈착 및 주입시켰다.

2. 악취 시료 채취 및 분석방법

2.1 공기 희석 관능법

복합악취는 무취공기에 실린지를 이용해 시료를 단계적으로 주입하여 희석시킨 후 악취공정시험법에 따라 희석배수를 단계적으로 산정하였다. 악취방지법에서 복합악취에 대한 배출허용기준치를 Table 5에 수록하였다.

악취판정은 악취판정요원이 제공된 악취희석시료의 냄새를 맡은 후 냄새감지 여부를 기록하였다. 판정요원의 정답률(평균)이 0.6 이상일 경우에는 계속 실험을 진행하였고, 0.6 미만일 경우에는 복합악취 측정을 종료하였다. 복합악취 결과는 냄새 판정 결과 중 최소값과 최대값을 제외한 나머지 인원의 희석배수를 기하평균하여 측정결과를 산출하였다.

Table 5. Limit values of emission standard of complex odor.

Category	General standard (Dilution-to threshold ratio)		Strict standard (Dilution-to threshold ratio)	
	Industrial area	Others	Industrial area	Others
	Outlet	under 1,000	under 500	500~1,000
Boundary	under 20	under 15	15~20	10~15

2.2 암모니아 채취 및 분석

암모니아 성분은 용액흡수법을 이용하여 시료를 채취하였다. 이때 사용된 흡수용액은 0.5% 붕산용액을 사용하였고, 2개의 200 mL 임핀저에 각각 20 mL를 채워 직렬로 연결시켰다. 그리고 흡입펌프 (Sibata, KP-100, Japan)로 10 L/min 유속을 5분간 유지하여 총 50 L의 공기 시료를 채취하였다. 채취가 끝난 흡수용액은 부피플라스크에 옮겨 담아 50 mL로 희석하여 분석용 시료로 사용하였다.

분석용 시료 10 mL에 페놀펜타시아노니트로실철(III)산 나트륨과 차아염소산 나트륨을 각각 5 mL씩 가했다. 그리고 incubator에서 25°C로 1시간동안 발색시킨 후 640 nm 파장으로 흡광도를 측정하여 정량 분석하였다(Figure 2).



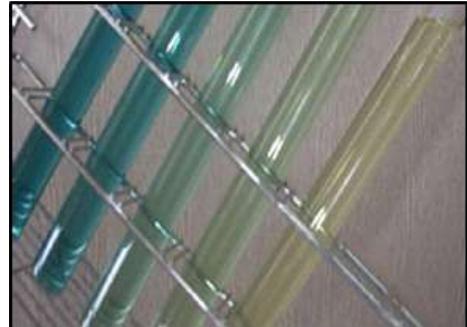
Sampling ammonia gas using impinger (10 mL)



Adding sodium nitroprusside (III)/phenol 5 mL and NaOCl 5 mL



Observing absorbance at 640 nm by UV-Visible spectrophotometer



Standing for 60 minutes at 25°C

Figure 2. Experimental procedure for the ammonia analysis.

2.3 트리메틸아민 채취 및 분석

트리메틸아민 시료 채취는 용액흡수법을 이용하였고, 0.1 M 황산용액을 흡수용액으로 사용하였다. 200 mL 임핀저 2개를 직렬로 연결하고 각각 20 mL씩 흡수용액을 채운 후, 흡입펌프(Sibata, KP-100, Japan)를 이용하여 10 L/min 유속으로 5분동안 50 L의 공기를 통과시켰다. 2개의 임핀저에 흡수용액들은 50 mL 부피플라스크에 옮겨 담아 희석하여 분석용 시료로 사용하였고, 이 때 임핀저 내부를 흡수용액으로 씻어내어 시료에 포함시켰다.

TMA 성분은 Headspace System에서 전처리한 후 GC/NPD로 분석하였다. 용액흡수법으로 채취한 흡수용액 5 mL를 바이알에 옮겨 50% KOH 4 mL를 가한 후 PTFE/Silicone septum으로 밀봉하였다. 그리고 Headspace System에서 60°C로 10분 간 교반한 후, 바이알 상층부의 시료를 GC/NPD (Shimadzu, GC-2030, Japan)에 주입하여 정량분석하였다(Figure 3). 이 때 Headspace system과 GC-NPD 분석조건은 Table 6과 같다.



Figure 3. Gas Chromatograph coupled with Nitrogen Phosphorous Detector (NPD).

Table 6. Instrumental conditions for the analysis of trimethylamine.

Instrument	Operation Conditions	
Headspace System (Perkin Elmer)	Oven temperature	60 °C
	Transfer temperature	130 °C
	Injection time	0.05 min
	Pressurizing time	1 min
	Thermo starting time	10 min
	Vial pressure	19 psi
GC/NPD (GC-2030)	Column	Elite-5Amine (30 m × 0.53 mm × 3 μm)
	Initial temperature	50 °C (5 min)
	Temperature rate	10 °C/min to 220 °C
	Final temperature	220 °C (3 min)
	Detector temperature	250 °C

2.4 황 화합물 채취 및 분석

황 화합물 시료는 내·외부 간 압력차이를 이용하여 시료 채취 주머니에 공기를 흡입하는 진공간접흡인방법을 이용하였다. 시료채취 주머니는 Polyester aluminum sampling bag (BMS, 5 L, Japan)을 사용하였고, 시료 채취기는 진공흡입상자 (Supelco, 10642, USA)를 이용하여 1~2 L/min 유속으로 총 5 L의 공기시료를 포집하였다. 채취한 공기시료는 직사광선을 피하고, 상온을 유지하여 24시간 이내에 분석을 진행하였다.

황 화합물 시료의 분석은 Thermal Desorber System (Markes International, Unity2™ -Air Server, UK)이 부착된 GC를 이용하여 분석하였고, 이때 기기조건은 Table 7에 수록하였다. 채취된 시료는 cold trap에서 -15°C로 응축시킨 후, 이를 250°C에서 열탈착시켜 GC에 주입하였고, 불꽃광도검출기가 부착된 GC-FPD (Shimadzu, 2010 plus, Japan)로 분석하였다(Figure 4).



Figure 4. Gas Chromatograph coupled with Flame Photometric Detector (FPD).

Table 7. Instrumental conditions for the analysis of sulfur compounds.

Instrument	Operation Conditions	
Thermal Desorber (Unity2 TM -Air Server)	Sampling flow	50 mL/min
	Sampling time	10 min
	Cold trap	Hydrogen Sulfide
	Cold trap low temperature	-15°C
	Cold trap high temperature	250°C
	Cold trap hold time	5 min
GC/FPD (GC-2010 plus)	Column	Varian CP-SIL 5CB (60 m × 0.32 mm × 5 μm)
	Initial temperature	50°C (7 min)
	Temperature rate	10°C/min to 280°C
	Final temperature	280°C (5 min)
	Detector temperature	300°C

2.5 알데하이드 화합물 채취 및 분석

알데하이드 화합물 acetaldehyde (ACHO), propionaldehyde (PCHO), butyr-aldehyde (BCHO), *iso*-valeraldehyde (*iso*-VCHO), *n*-valeraldehyde (*n*-VCHO) 등 총 5종의 시료는 2,4-dinitrophenylhydrazine (2,4-DNPH)가 충전된 카트리지를 사용하여 채취하였다. 이 때 알데하이드 화합물의 영향을 주는 방해요인을 제거하기 위하여 요오드화칼륨(KI)가 충전된 오존 스크리버를 앞단에 장착하였다. 이렇게 연결된 카트리지를 흡입펌프 (Sibata, MP- Σ 100H, Japan)에 연결하여 1.0 L/min 유속으로 10 분간, 총 10 L의 공기시료를 통과시켰다.

DNPH 카트리지에 채취한 알데하이드 화합물은 아세토나이트릴(Acetonitrile) 용매 1.0 mL를 주입하여 분석용 시료를 추출하였다. 그리고 추출된 시료는 액체 크로마토그래피(Shimadzu, Nexera, Japan)를 이용하여 Table 8와 같은 조건에서 360 nm 파장으로 분석하였다(Figure 5).



Figure 5. High Performance Liquid Chromatograph coupled with Photodiode Array Detector

Table 8. Instrumental conditions for the analysis of aldehyde compounds.

Instrument	Operation Conditions	
HPLC (Module L-40D)	Column	Shim-pack GIS C18 (250 mm × 4.6 mm × 5 μm)
	Detector	Photodiode Array Detector SPD-M40
	Wavelength	360 nm
	Injection volume	10 μL
	Flow rate	1 mL/min
	Mobile phase	A : ACN B : ACN/Water/THF(45/50/5)

2.6 휘발성 유기화합물 채취 및 분석

Styrene (STR), toluene (TOL), xylene (XYL), methyl ethyl ketone (MEK), methyl *iso*-butyl ketone (MIBK), butyl acetate (BuAc), *iso*-butyl alcohol (*iso*-BuAl) 등의 7종 휘발성 유기화합물 성분들은 고체흡착관(PerkinElmer Inc., Tenax-TA, USA)에 포집하였다. 이 때 사용된 흡입펌프는 Mini pump (Sibata, MP-Σ30KNII, Japan)를 사용하였고, 10 분동안 0.1 L/min 유속으로 1.0 L의 공기를 통과시켜 시료를 채취하였다.

고체흡착관에 흡착된 휘발성 유기화합물은 Thermal desorber (PerkinElmer Inc., Turbomatrix 350, USA)가 연결된 GC를 이용하여 Table 9의 기기조건으로 분석하였다. 채취한 시료는 300℃로 10분 동안 고체흡착관에서 탈착하여 cold Trap (-30℃)에서 응축한 후, 이를 열탈착시켜 GC/MSD (Shimadzu, GC-2010 plus, MS-TQ8040, Japan)로 주입하여 분석하였다(Figure 6).



Figure 6. Gas Chromatograph coupled with Mass Selective Detector

Table 9. Instrumental conditions for the analysis of volatile organic compounds.

Instrument	Operation Conditions	
Auto Thermal Desorber (TurboMatrix 350)	Desorption temperature	300 °C
	Desorption time	10 min
	Cold trap	Tenax-TA
	Cold trap Low temperature	-30 °C
	Cold trap High temperature	320 °C
	Cold trap hold time	5 min
GC/MSD (GC-2010plus / MS-TQ8040)	Column	DB-1MS UI (60 m × 0.25 mm × 0.25 μm)
	Initial temperature	40 °C (5 min)
	Temperature rate	10 °C/min to 250 °C
	Final temperature	250 °C (4 min)
	Detector	Mass

2.7 휘발성 저급지방산 분석

휘발성 저급지방산 propionic acid (PA), butyric acid (BA), *iso*-valeric acid (*iso*-VA) *n*-valeric acid (*n*-VA) 성분들은 암모니아, 트리메틸아민 성분들과 같이 동일한 용액흡수법을 이용하여 채취하였다. 0.1 M 수산화나트륨용액을 20 mL 씩 채운 2개의 임핀저를 직렬로 흡입펌프(Sibata, KP-100, Japan)에 연결하고, 5 분동안 10 L/min 유속으로 50 L의 공기를 포집하였다. 채취가 끝난 흡수용액은 부피플라스크에 옮겨 담아 50 mL로 희석하여 분석용 시료로 사용하였다. 이 때 임핀저 내부를 0.1 M 수산화나트륨용액으로 씻어 시료에 포함되도록 하였다.

휘발성 저급지방산 시료는 SPME system이 부착된 GC/FID로 분석하였다. 시료를 채취한 흡수용액 5 mL를 바이알에 옮겨 염화나트륨 1.78 g, 2% H₂SO₄ 1 mL를 가하여 pH 1.0으로 조절한 후, PTFE/Silicone septum으로 밀봉하였다. 그리고 SPME system에서 90℃로 15분 간 교반하고 바이알 상층부의 기체상 지방산을 SPME fiber에 흡착시켰다. 이를 GC/FID (Shimadzu, GC-2030, Japan)의 injector에서 250℃로 탈착시킨 후, 컬럼에 주입하여 정량분석을 하였다(Figure 7). 이때 시료의 SPME system 및 GC/FID 분석조건은 Table 10과 같다.

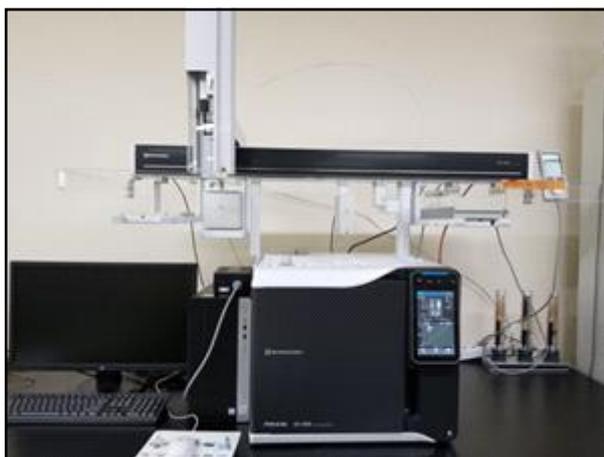


Figure 7. Gas Chromatograph coupled with SPME (Solid Phase Micro Extraction) system

Table 10. Instrumental conditions for the analysis of volatile fatty acids.

Instrument	Operation Conditions	
SPME System (AOC-6000)	Preincubation time	15 min
	Incubation temperature	90 °C
	Extraction time	20 min
	Agitator speed	250 rpm
	Dersoption time	10 min
GC/MSD (Clarus 680 / Clarus 600T)	Column information	Elite-Wax (30 m × 0.53 mm × 0.5 μm)
	Injector temperature	250 °C
	Initial temperature	50 °C (3 min)
	Temperature rate	10 °C/min to 220 °C
	Final temperature	220 °C (5 min)
	Detector temperature	300 °C

2.8 페놀류, 인돌류 채취 및 분석

페놀화합물과 인돌화합물은 휘발성 유기화합물과 마찬가지로 PerkinElemer사의 Tenax-TA에 포집하였고, 0.1 L/min 유속으로 10 분동안 1.0 L의 공기가 통과하도록 설정된 Mini pump (Sibata, MP-Σ30KN II, Japan)를 이용하였다.

채취한 시료의 분석 방법은 국내 약취공정시험방법에는 규정되어 있지 않아 선행연구를 참고하여 분석을 실시하였다(신혜수 등, 2016; Trabue *et al.*, 2011). Thermal desorber (PerkinElmer Inc., Turbomatrix 350, USA)가 연결된 GC/MSD (Shimadzu, GC-2010plus & MS- TQ8040, Japan)를 이용하여 휘발성 유기화합물 분석 방법과 동일한 조건으로 분석하였다(Table 9).

2.9 분석 데이터 신뢰도 평가

분석 데이터의 신뢰도는 방법검출한계 (Method detection limit, MDL)를 구하여 평가하였다. MDL은 암모니아 0.4 μg/mL, 트리메틸아민 6.0 ng/mL, 황 화합물 4종 1.0 nmol/mol, 알데하이드 화합물 5종 0.05 μg/mL, 휘발성 유기화합물 7

중 1 nmol/mol, 휘발성 저급지방산 4종 0.1 $\mu\text{mol/mol}$, 페놀류 2종 및 인돌류 2종 0.5 $\mu\text{g/mL}$ 의 각 표준물질들을 사용하였다. 그리고 각 성분들의 분석을 7회 반복해서 표준편차를 구하고, 이 값에 Student-t (3.143)를 곱하여 98% 신뢰수준으로 측정하였다. 또한 데이터의 재현성 확인은 7회 반복 분석한 데이터로부터 변동계수 (Coefficient of variation, CV)를 구하여 확인하였고, 이렇게 구한 분석 데이터의 방법검출한계와 변동계수를 Table 11에 수록하였다.

$$\text{표준편차(standard deviation) } S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

$$\text{변동계수(coefficient of variation) } CV = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\%$$

$$MDL = S \times 3.143 \text{ (98\% confidence level, } n=7)$$

Table 11. Method detection limit (MDL) and coefficient of variation (CV) for the analysis of odorous compounds (n=7).

Compounds	MDL	CV (%)
Ammonia (NH ₃)	0.304 ppm	7.6
Trimethylamine (TMA)	0.802 ppb	4.1
Hydrogen sulfide (H ₂ S)	0.062 ppb	2.1
Methyl mercaptan (CH ₃ SH)	0.089 ppb	3.1
Dimethyl sulfide (DMS)	0.106 ppb	3.5
Dimethyl disulfide (DMDS)	0.071 ppb	2.4
Acetaldehyde (ACHO)	0.018 ppb	1.1
Propionaldehyde (PCHO)	0.036 ppb	2.3
Butylaldehyde (BCHO)	0.062 ppb	4.5
<i>iso</i> -Valeraldehyde (<i>iso</i> -VCHO)	0.032 ppb	2.5
<i>n</i> -Valeraldehyde (<i>n</i> -VCHO)	0.037 ppb	2.7
Styrene(STR)	0.103 ppb	1.7
Toluene(TOL)	0.108 ppb	1.7
Xylene(XYL)	0.113 ppb	1.8
Methyl ethyl ketone (MEK)	0.212 ppb	4.8
Methyl <i>iso</i> -butyl ketone (MIBK)	0.121 ppb	3.2
Butyl acetate (BuAc)	0.071 ppb	1.9
<i>iso</i> -butyl alcohol (<i>iso</i> -BuAl)	0.142 ppb	3.8
Propionic acid (PA)	0.014 ppm	4.3
Butyric acid (BA)	0.014 ppm	3.8
<i>iso</i> -Valeric acid (<i>iso</i> -VA)	0.024 ppm	6.9
<i>n</i> -Valeric acid (<i>n</i> -VA)	0.020 ppm	5.4
Phenol(PHE)	0.050 ppb	5.7
<i>p</i> -Cresol(<i>p</i> -C)	0.014 ppb	1.1
Indole(IND)	0.030 ppb	5.9
Skatole(SKT)	0.024 ppb	5.0

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 복합악취 결과

악취는 특정한 몇 가지의 물질에 의하여 발생하는 것이 아니라 여러 물질이 혼합된 형태의 물질을 말한다. 이러한 복합악취는 악취 성분들이 복합적으로 상승 혹은 상쇄작용 등을 일으키기 때문에 단순한 성분의 합으로 판단하기에는 한계가 있다(송정민, 2014).

악취방지법이 초기에는 악취 측정을 현장에서 실시하는 직접관능법으로 실시하였으나, 직접관능 측정에 객관성 부족으로 2008년부터 공기희석관능법과 기기분석법으로 관리하고 있다. 공기희석관능법은 복합악취를 우리나라에서는 정해진 배수에 따라 단계별로 희석하여 측정하는 방법으로 악취 관리에 주로 사용되고 있다. 또한 악취방지법에는 악취배출사업장에서 발생하는 악취물질에 대해 주기적으로 복합악취 측정을 통하여 악취 관리를 수행하고 있다. 그리고 자체적인 악취관리에도 불구하고 민원이 지속되면 악취관리지역으로 지정하고 있다.

본 연구에서는 제주지역에서 2018년 11월부터 12월까지 총 3회에 걸쳐 4개 양돈장에서 복합악취 시료를 채취하였고, 측정 결과는 Table 12와 Figure 8에 나타내었다. 4개 양돈시설 부지경계선에서 채취한 복합악취의 평균 희석배수는 71~174배로 A 농장이 가장 높은 희석배수를 나타내었다. 그러나 이들 양돈장 모두 환경부 악취 방지법 배출허용기준치 10배를 모두 초과하는 것으로 조사되었다.

각 농장별 악취 희석배수를 비교해본 결과에서는 A 농장이 부지경계선에서 174배로 가장 큰 희석배수를 나타내었다. 그 이유는 A 농장이 다른 측정 양돈장들과 다르게 주변이 밀집형 단지 구조로 되어 있어 시료채취 시 주변 양돈장의 영향을 받은 것으로 추정된다. 이를 통하여 이들 양돈장에서 발생하는 악취는 주변지역 민원 발생에 영향을 줄 것으로 판단된다. 그러나 복합악취는 악취발생의 유무와 감도를 평가하는데 유용하게 사용되고 있으나, 개별물질에 대한 발생량과 발생원을 추정하는데 한계가 있다.

Table 12. Dilution ratios for the complex odor measurement at the boundary of four swine farms.

	A farm	B farm	C farm	D farm
Dilution to threshold (D/T)	174±146	73±62	71±28	77±40

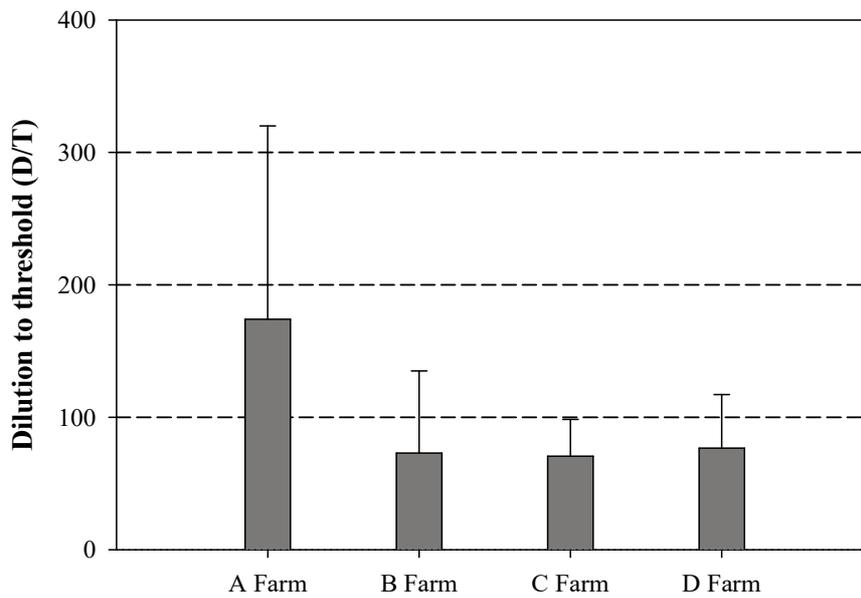


Figure 8. Comparison of complex odors at the boundary of four swine farms.

2. 농장별 악취물질 농도

2.1 암모니아 농도

암모니아(NH_3)는 국내 악취방지법에서 22종 지정 악취물질 중 대표적인 물질로 극미량에서 ppb 수준 감지가 가능한 악취물질들에 비해 상대적으로 감지 한계가 높은 것으로 알려져있다(Kim and Choi, 2013; 김기현 등, 2005).

암모니아는 표준상태에서 안정하고 발화의 위험성은 적지만, 고농도로 장기간 노출되면 인체에 부작용을 유발한다(이종국, 2011). 암모니아 농도가 약 100 ppm 에서는 눈, 코 및 피부에 자극을 일으키고, 400 ppm 이상 농도에서는 정신적 불안정, 흉부압박감 등의 증상이 나타난다. 그리고 1,500 ppm 의 농도에 노출될 시에는 기침과 입에 거품을 일으키고, 5,000 ppm의 고농도에서는 호흡곤란, 기관지 질환 등이 심하면 사망에 이를 수도 있다(류희욱 등, 2003; 김소진 등, 1997; Muehling 1970). 이를 방지하기 위해서 노동부에서는 고농도 배출사업장을 대상으로 TWA (Time Weighted Average Concentration) 28 ppm (18 mg/m^3)을 적용하여 관리하고 있다.

암모니아는 가축 체내의 장에서 형성되고 간에서 요소로 전환되고, 전환된 요소는 분의 요소분해를 통해 암모늄으로 전환이 된다. 그리고 다른 발생원으로는 미생물의 분해에 의해 생성된 질소화합물이 소화가 불충분하게 이루어진 가축 사료나 배설된 분뇨를 통해 만들어진다(이은영과 이소진, 2010). 이러한 가축사료의 단백질은 돼지분뇨에서 발생하는 질소의 주된 요인으로 미국 EDF (The Environmental Defense Fund) 연구결과에서는 돼지분뇨의 질소계열 화합물 중 약 80% 이상이 암모니아로 기화되는 것으로 보고되고 있다(이하영, 2003; Klarenbeek and Bruins, 1998).

제주지역 양돈장에서 2018년 11월부터 12월동안에 부지경계선, 육성돈사, 비육돈사에서 암모니아 시료를 채취하였으며, 그 결과를 Table 13와 Figure 9에 나타내었다. 암모니아 농도는 부지경계선에서 0.14~1.57 ppm의 범위로 D 농장에서 가장 1.57 ppm으로 높은 농도를 보였다. 이때 D 농장은 환경부 악취공정법 배출허용기준치 1.0 ppm를 초과하였고, 나머지 농장은 배출기준치 미만인 것으로 조사되었다. 육성돈사와 비육돈사 내부에서 암모니아 농도는 각각 6.10~17.76

ppm, 6.99~29.21 ppm 범위로 조사되었다.

각 농장별로 암모니아 농도를 상호 비교한 결과, A 농장의 육성돈사와 비육돈사에서는 각각 6.10 ppm, 29.21 ppm으로 비육돈사가 육성돈사에 비해 암모니아 농도가 크게 높았다. 그 이유는 비육돈사에서 시료 채취 시 피트 하단에 분뇨 순환 발효로 암모니아 농도가 일시적으로 증가한 것으로 판단된다. 그리고 이들 돈사 내부에서 배출된 암모니아는 부지경계선에서 0.14 ppm으로 43.0~206.2배 감소되는 것으로 확인되었다.

B 농장의 육성돈사와 비육돈사 내부에서 암모니아는 각각 17.76 ppm, 17.64 ppm으로 두 돈사에서 비슷한 농도를 나타내었다. 부지경계선 암모니아 농도는 0.15 ppm으로 두 돈사 내부에서 배출되어 부지경계선에서는 각각 115.5, 114.7배 감소하는 경향을 보였다. C 농장은 육성돈사 13.58 ppm, 비육돈사 6.99 ppm으로 육성돈사에서 암모니아 농도가 다소 높은 것으로 나타났다. 부지경계선에서는 암모니아 농도가 0.11 ppm으로 A, B 농장과 유사한 수준인 것으로 확인되었다.

D 농장에서 부지경계선, 육성돈사, 비육돈사의 암모니아 평균 농도는 각각 1.57, 17.30, 14.41 ppm를 나타내었다. 이들 육성돈사와 비육돈사에서 배출된 암모니아 농도는 부지경계선에서 7.5~9.0배 낮은 농도를 보였지만 악취공정법 배출허용기준치보다 1.6배 초과한 것으로 조사되었다. 육성돈사와 비육돈사의 내부 암모니아는 다른 농장과 비슷한 수준의 농도를 보였으나 부지경계선에서는 다른 농장에 비해 높은 농도를 나타내었다. 그 이유는 A, B, C 농장은 주변에 타 양돈장이 없는 지리적 위치에 있지만, D 농장은 주변에 양돈장이 밀집되어 있어 주변 양돈장에서 배출되는 악취물질의 영향을 받는 것으로 추정된다.

이러한 결과로부터 4개 양돈시설 중 D 농장을 제외한 나머지 농장들은 악취공정시험법 배출허용 기준치보다 낮은 것으로 조사되었다. 그리고 대부분 농장에서 육성돈사와 비육돈사 내부의 암모니아 농도수준은 가축의 성장을 저해하고, 밀폐된 공간에서는 호흡기 계통의 질병을 유발할 수 있는 농도(15 ppm)와 유사한 것으로 나타났다. 따라서 암모니아는 악취 민원에는 영향이 미미한 물질이지만, 양돈장 내부에서는 돈사 가축과 작업자 환경을 위해서는 관리가 필요한 것으로 판단된다.

Table 13. Concentrations of ammonia for four swine farms.

Farm	Concentration (ppm)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.14±0.13	6.10±1.50	29.21±3.16	43.0	206.2
B	0.15±0.11	17.76±3.04	17.64±1.80	115.5	114.7
C	0.11±0.02	13.58±11.08	6.99±8.56	126.4	65.0
D	1.57±1.67	17.30±4.75	14.41±8.96	11.0	9.2

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

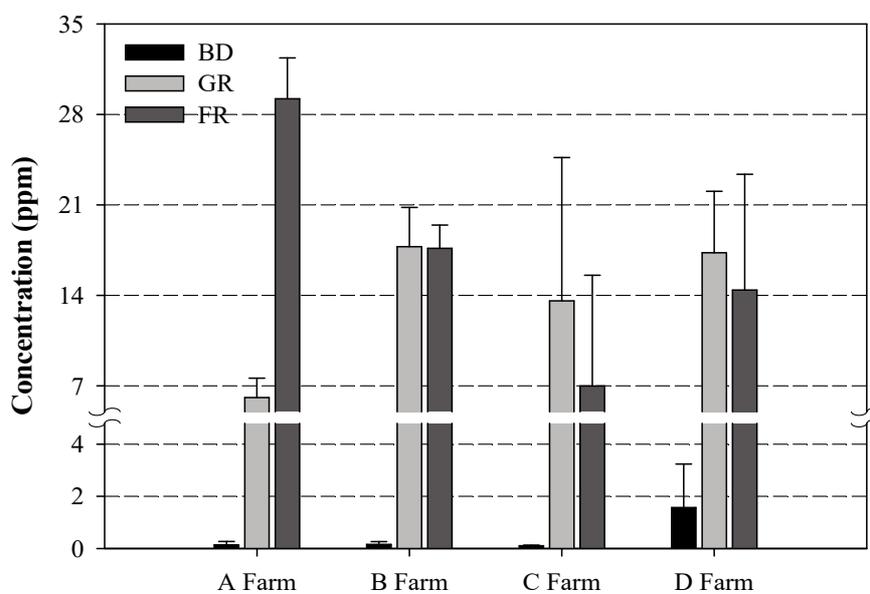


Figure 9. Comparison of ammonia concentrations for four swine farms.

2.2 트리메틸아민 농도

트리메틸아민(Trimethylamine, TMA)은 무색 자극성 가스로 용해도가 높은 물질로 암모니아성분에서 3개의 수소가 메틸기로 변환된 3차 아민의 형태로 N, N-dimethylamine 또는 N-trimethylamine으로 불린다. 또 트리메틸아민은 생선 비린내 외에도 금속의 부식, 인체 자극성을 지닌 것으로 알려져 있다. 낮은 농도에서는 눈이나 피부 자극을 주고, 급성 중독 시에는 폐자극, 눈자극, 간장에 등 심각한 인체피해를 준다. 또한 고농도 노출 시에는 현기증, 두통, 호흡기 자극 및 각막 손상을 일으키는 것으로 보고되고 있다(노기환, 2004). 따라서 환경부에서는 트리메틸아민이 고농도로 배출시 인체에 우려되는 작업환경에 대해서는 산업안전보건법에 따라 TWA 100 ppm (24 mg/m³), STEL 15 ppm (36 mg/m³)을 적용하여 관리하고 있다.

4개 양돈장에서 용액흡수법을 이용하여 트리메틸아민 시료를 채취하여 분석 결과를 Table 14와 Figure 10에 나타내었다. 4개 양돈장에서 트리메틸아민 성분은 육성돈사, 비육돈사에서 각각 15.80~25.16 ppb, 13.90~37.26 ppb의 농도범위를 보였고, D 농장을 제외한 나머지 농장에서 암모니아성분과 유사한 패턴을 보였다. 그리고 이들 양돈시설 부지경계선에서 트리메틸아민 농도는 0.01~0.45 ppb로 약취공정법 배출허용기준치 5 ppb보다 낮은 것으로 조사되었다.

트리메틸아민 성분을 농장별로 구분하여 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 비교한 결과, A, D 농장 비육돈사의 트리메틸아민 농도가 각각 29.21, 14.41 ppb로 육성돈사에 비해 2.0, 1.5배 높았다(Figure 10). 이들 돈사에서 배출되는 트리메틸아민 농도는 부지경계선에서 37.6~100.7배 감소하는 경향을 보였다. 그리고 B, C 농장의 트리메틸아민 농도는 육성돈사 15.80~24.24 ppb, 비육돈사 13.90~18.76 ppb로 육성돈사가 비육돈사보다 높았고, 부지경계선은 농도는 A, D 농장과 유사하게 감소되는 것으로 확인되었다. 이러한 결과로부터 트리메틸아민 성분은 질소계열인 암모니아와 유사한 농도패턴으로 암모니아와 동일한 기원에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

이러한 두 물질의 기원을 확인하기 위하여 트리메틸아민 성분과 암모니아의 상관관계를 산출하였고, 상관계수(r)가 0.76으로 양호한 것으로 조사되었다. 이 결과로부터 이들 두 성분은 배출원이 동일한 것으로 추정된다.

양돈시설에서 배출되는 트리메틸아민 농도는 암모니아 성분에 비해 매우 낮은 농도수준을 보였다. 하지만 트리메틸아민의 최소감지농도가 0.000032 ppm로 암모니아 0.1 ppm에 비해 낮기 때문에 낮은 농도에서도 감지 및 악취를 유발할 수 있는 것으로 사료된다.

Table 14. Concentrations of trimethylamine for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.45±0.17	16.85±0.71	33.33±9.69	37.6	74.4
B	0.29±0.20	15.80±2.58	13.90±1.61	54.5	48.0
C	0.01±0.01	24.24±7.87	18.76±5.92	1723.2	1333.1
D	0.37±0.22	25.16±10.00	37.26±20.09	68.0	100.7

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

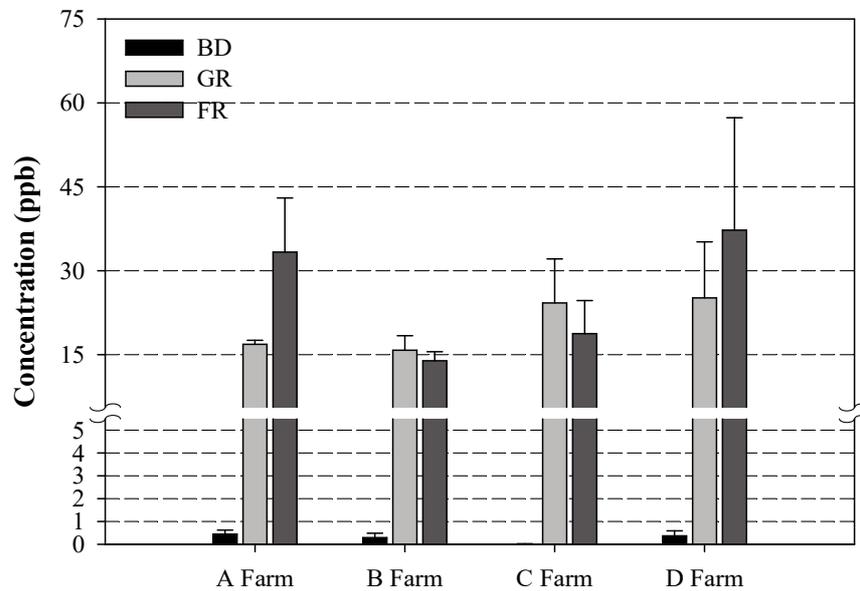


Figure 10. Comparison of trimethylamine concentrations for four swine farms.

2.3 황 화합물

환경부 악취공정시험방법에서 지정악취물질 중 황 화합물 성분은 황화수소 (H_2S), 메틸머캅탄 (CH_3SH), 이황화메틸 (DMS), 이황화이메틸 (DMDS) 성분들을 대상으로 관리하고 있다. 황화수소 성분은 자극성이 심하고 달걀 썩은 냄새를 유발하는 무색 기체로 독성, 부식성, 불쾌감을 유발하는 특성이 있다. 메틸머캅탄은 무색의 기체로 썩은 양배추 냄새, 마늘냄새를 발생하며 물에 쉽게 용해되는 특성이 있다. 그리고 황화이메틸은 노란색을 띠는 기체물질로 가솔린, 불쾌한 냄새, 부패한 냄새를 발생하며, 이황화이메틸은 마늘 냄새, 불쾌한 냄새, 썩은 냄새를 유발하는 특성을 가진다.

황화수소는 자극성 기체로 일평균 10 ppbv 이상의 농도가 되면 눈과 코가 따갑고 목에 통증을 유발한다. 미국 ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry)에서 흡입시 최소위험농도 (Minimum risk level, MRL)를 30 ppbv로 규정하고 있고, 낮은 농도에서도 독성이 강하여 두통, 현기증, 흥분 등을 일으킬 수 있다. 고농도로 흡입할 경우, 산화 효소의 파괴로 세포의 내부 호흡이 멈추며 중추 신경이 마비되어 실신하거나 호흡 정지 및 질식 증상이 나타난다. 또 다른 악취 성분들과 달리 아주 낮은 농도에서도 감지되며, 1,000 ppm 정도에서는 즉시 의식을 잃거나 사망 할 수 있는 것으로 보고되고 있다(안민호., 2010; Muehling, 1970).

돈사 내 주요 유해 악취물질인 황 화합물은 세균에 의해 발생되며, 그 기작은 황산염의 환원과정과 황을 함유한 아미노산의 대사과정에 의해 생성된다. 황산염의 환원은 동화작용과 이화작용에서 모두 일어나며, 이 중 동화작용에서는 세포의 생합성을 위해 충분한 양의 환원형 황을 생성한다. 반면에 이화작용에선 황산염을 최종전자수용체로 이용하여 대량의 황 화합물을 생성한다(이은영과 임정수, 2010; Hao *et al.*, 1996).

이처럼 여러 가지 작용으로 발생하는 황 계열 악취물질 황화수소(H_2S), 메틸머캅탄(CH_3SH), 이황화메틸(DMS), 이황화이메틸(DMDS) 성분들을 4개 양돈장에서 시료를 채취하였으며, 그 결과를 Figure 11~13과 Table 15~17에 나타내었다.

2.3.1 황화수소 농도

황화수소(Hydrogen sulfide, H₂S)는 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선로 구분하여 Aluminum bag에 시료를 채취하였고, 분석 결과는 Figure 11와 Table 15에 나타내었다. 육성돈사 내부에서 황화수소 농도는 159.65~4027.47 ppb를 보였고, 비육돈사에서는 168.78~5589.57 ppb의 범위로 C 농장의 육성돈사와 비육돈사 모두 농도가 가장 낮았다. 그리고 부지경계선에서 황화수소 농도는 1.26~7.90 ppb의 범위로 모든 농장에서 황화수소 배출허용기준치 20 ppb 미만으로 조사되었다.

황화수소 농도를 농장별 구분하여 비교한 결과, A 농장은 육성돈사와 비육돈사의 황화수소 농도가 각각 4,027.47, 5,589.57 ppb로 다른 농장들에 비해 다소 높은 것으로 확인되었다. 이들 돈사 내부에서 배출된 황화수소는 부지경계선에서 7.90 ppb로 509.9~707.7배 농도가 감소하는 경향을 보였다. B 농장에서 황화수소 농도는 육성돈사에서 539.73 ppb로 비육돈사 2822.06 ppb에 비해 낮은 농도를 나타내었다. 이들 돈사에서 배출된 황화수소는 부지경계선에서 1.80 ppb로 크게 감소하는 특징을 보였고, 이러한 결과는 황화수소 성분이 대기 중에서 광화학 및 광분해반응이 빠르게 일어나기 때문으로 사료된다.

C 농장은 육성돈사와 비육돈사의 황화수소 농도가 각각 159.65, 168.78 ppb로 두 돈사가 유사한 농도를 보였다. 그리고 C 농장의 돈사내부에서 황화수소 농도가 다른 농장들에 비해 현저히 낮은 농도를 보였으며, 이는 C 농장의 축사형태가 원치커튼형 방식으로 돈사 내·외부의 공기 순환이 원활하여 내부농도가 낮은 것으로 사료된다. 또한 부지경계선에서 황화수소 농도가 1.26 ppb로 다른 농장에 비해 가장 낮은 수준을 보였다. D 농장의 황화수소는 육성돈사 1804.87 ppb, 비육돈사 431.60 ppb, 부지경계선 5.30 ppb로 이들 육성돈사와 비육돈사에서 발생한 황화수소는 부지경계선에서 81.4~340.4배 감소되는 경향을 나타내었다.

위의 결과로부터 측정 양돈장의 부지경계선에서는 악취공정시험법 배출허용기준치 20 ppb보다 낮기 때문에 악취 민원 발생에 미치는 영향이 적을 것으로 추정된다. 그러나 돈사 내부에서는 가축과 작업자 건강에 악영향을 미칠 수 있는 농도수준으로 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Table 15. Concentrations of hydrogen sulfide for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	7.90±4.95	4027.47±359.55	5589.57±140.74	509.9	707.7
B	1.80±2.37	539.73±351.64	2823.06±1099.57	300.4	1571.2
C	1.26±1.24	159.65±59.25	168.78±110.10	126.7	133.9
D	5.30±4.74	1804.87±597.82	431.60±224.51	340.4	81.4

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

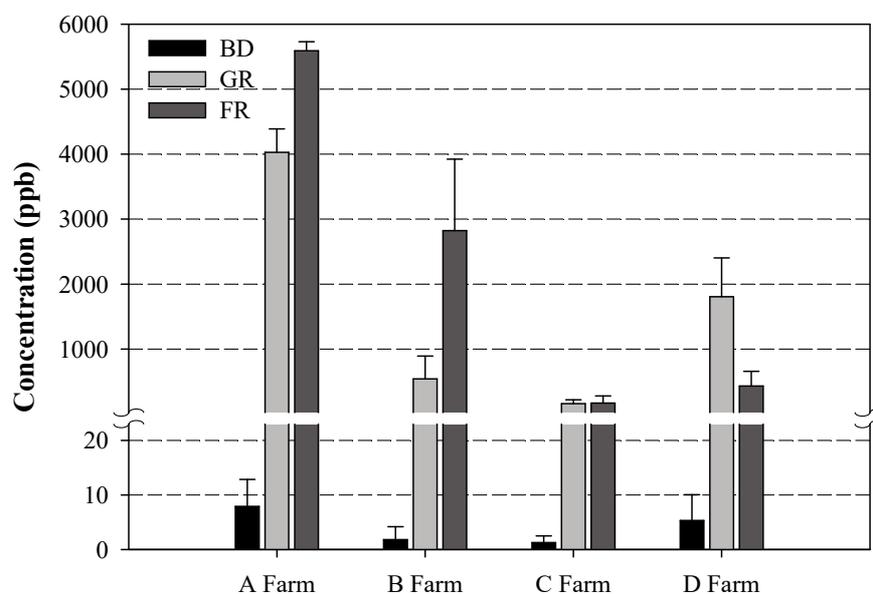


Figure 11. Comparison of hydrogen sulfide concentrations for four swine farms.

2.3.2 메틸머캅탄 농도

제주지역 4개의 양돈장 부지경계선과 돈사 내부인 육성돈사, 비육돈사에서 메틸머캅탄(Methylmercaptan, CH₃SH)를 채취하여 분석하였으며, 그 결과를 Figure 12와 Table 16에 나타내었다. 메틸머캅탄의 농도는 육성돈사, 비육돈사에서 각각 8.42~161.70 ppb, 10.19~58.79 ppb의 범위로 A 농장이 161.70 ppb 가장 높은 농도를 보였다. 그리고 부지경계선에서는 측정된 모든 농장에서 불검출로 나타났다.

각 농장별로 구분하여 메틸머캅탄 농도를 비교해 본 결과에서 A 농장은 메틸머캅탄 농도가 육성돈사 161.70 ppb, 비육돈사 58.79 ppb로 육성돈사에서 다소 높은 농도를 보였고, 부지경계선은 메틸머캅탄 성분이 불검출 되는 것으로 확인되었다.

B 농장에서 메틸머캅탄 농도는 부지경계선, 육성돈사, 비육돈사 각각 불검출, 8.42, 18.90 ppb로 나타났다. C 농장에서 메틸머캅탄 성분이 육성돈사와 비육돈사가 각각 25.15, 10.19 ppb로 확인되었다. D 농장 또한 부지경계선에서 메틸머캅탄이 불검출로 나타났고, 육성돈사 28.76 ppb 비육돈사 32.86 ppb의 농도를 보였다.

이러한 결과로부터 모든 양돈시설에서 메틸머캅탄 성분은 부지경계선에서 불검출되었고, 그 이유는 돈사 내부에서 배출된 메틸머캅탄 성분이 대기 중에서 짧은 시간에 분해가 일어나기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 메틸머캅탄 성분은 양돈장에서 배출되는 악취 물질이 아닌 것으로 추정된다.

Table 16. Concentrations of methylmercaptan for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	N.D.	161.70±78.52	58.79±24.46	-	-
B	N.D.	8.42±2.54	18.90±7.17	-	-
C	N.D.	25.15±22.55	10.19±4.93	-	-
D	N.D.	28.76±6.44	32.86±18.71	-	-

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room, N.D. : Not Detected

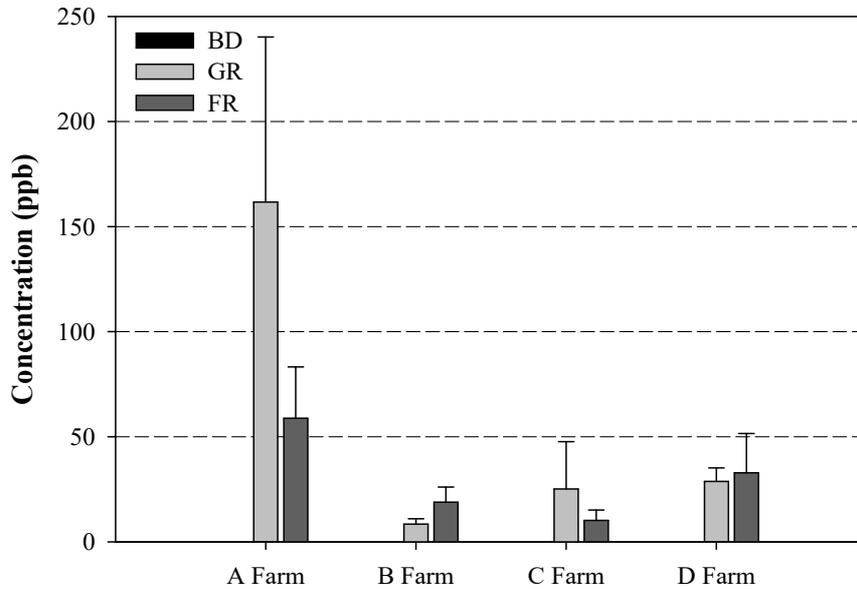


Figure 12. Comparison of methylmercaptan concentrations for four swine farms.

2.3.3 황화이메틸 농도

2018년 11월부터 12월까지 3회에 걸쳐 황화이메틸(Dimethylsulfide, DMS) 성분을 간접흡인방식으로 부지경계선, 육성돈사, 비육돈사에서 채취하였으며, 분석한 결과를 Figure 13과 Table 17에 나타내었다. 황화이메틸 농도는 육성돈사와 비육돈사에서 각각 5.53~18.83 ppb, 3.52~17.08 ppb로 환경부 악취공정법 배출허용기준치 10 ppb보다 다소 높았으나, 배출원인 것을 감안하면 낮은 수준인 것으로 사료된다. 부지경계선의 황화이메틸 농도는 0.47~0.78 ppb로 모든 농장에서 황화이메틸 배출허용기준보다 낮은 것으로 나타났다.

황화이메틸의 농도를 각 농장별로 비교한 결과, A 농장은 육성돈사에서 18.83 ppb, 비육돈사는 17.08 ppb로 측정한 양돈장 중 농도가 가장 높았고, 황화수소, 메틸머캡탄 성분과 유사한 농도 패턴을 나타내었다. 이러한 결과는 황 화합물이 동일한 배출원에서 발생하고 있는 것으로 추정할 수 있다. 특히 A 농장에서는 시료 채취 시 피트 하단에 있는 분뇨를 순환발효 가동으로 인하여 황 화합물 농도가 일시적으로 증가한 것으로 사료된다.

B 농장에서 황화이메틸 농도는 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 각각 5.76, 8.43, 0.78 ppb로 B 농장은 돈사 내·외부 모두 배출허용기준치 미만으로 조

사되었다. C 농장 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선의 황화이메틸 농도는 5.68, 3.52, 0.74 ppb로 나타났다. D 농장은 황화이메틸 농도가 육성돈사 5.53 ppb, 비육돈사 7.64 ppb, 부지경계선 0.56 ppb로 배출허용기준 미만을 보였고, B, C 농장과 동일한 경향을 보였다.

위의 결과로부터 4개 양돈장에서 황화이메틸은 부지경계선에서 악취공정법 배출허용기준치(10 ppb) 미만으로 악취 민원에 영향이 적은 물질로 사료된다.

Table 17. Concentrations of dimethylsulfide for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.47±0.06	18.83±6.12	17.08±7.28	40.4	36.6
B	0.78±0.12	5.76±0.29	8.43±3.12	7.4	10.8
C	0.74±0.40	5.68±5.17	3.52±1.83	7.7	4.8
D	0.56±0.17	5.53±2.13	7.64±4.20	9.8	13.6

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

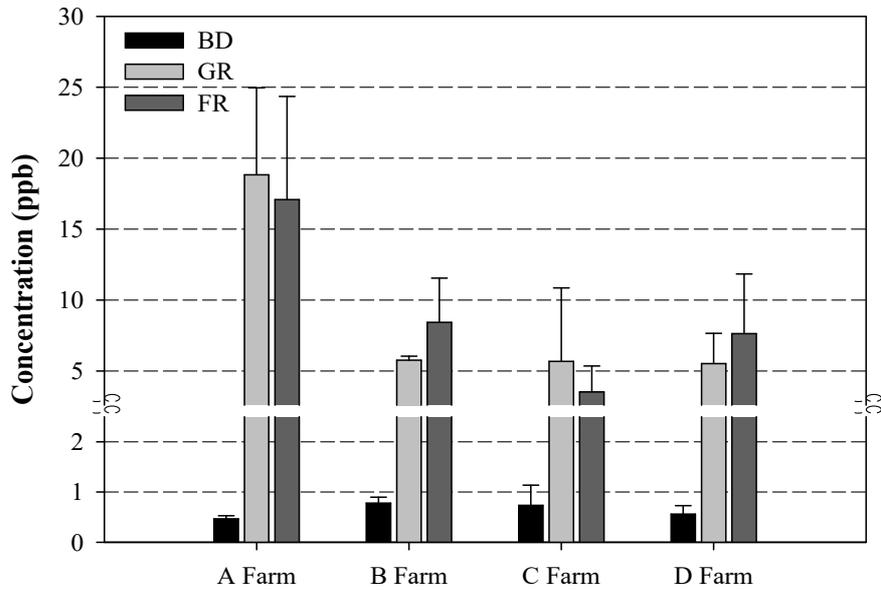


Figure 13. Comparison of dimethylsulfide concentrations for four swine farms.

2.3.4 이황화이메틸 농도

이황화이메틸(Dimethyldisulfide, DMDS)은 4개 측정 양돈장의 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 분석한 농도 수준이 방법검출한계 0.045 ppb 미만으로 ‘불검출’ 수준으로 조사되었다. 이러한 이황화이메틸 성분은 악취공정시험방법에서 제시한 배출허용기준 9 ppb를 훨씬 밑도는 수준으로 양돈장에서 발생하는 악취물질이 아닌 것으로 사료된다.

2.4 알데하이드 화합물

알데하이드 화합물은 제지, 접착제 등의 제조공정이나 차량으로부터 직접 배출된다(Morrison and Nazaroff, 2002; Kelly *et al.*, 1999). 그리고 대다수는 광화학 반응에 의한 부산물로 생성되어 1차 또는 2차 대기오염물로 존재하게 된다. 이들 화합물은 ozone, peroxy acetyl nitrates (PANs), peroxydicarboxylic acids를 포함하는 산화물과 카르복실산 형성 과정에서 기인자로 작용하며, 자유 라디칼과 유기성 에어로졸의 배출원이기도 하다(Grosjean *et al.*, 1996; Carter, 1995; Satsum-abayashi *et al.*, 1995). 또한 또한 광분해, hydroxyl radical (OH·) 또는 nitrate radical (NO₃·)과의 반응, 그리고 건·습식 침적에 의해 대기 중에서 제거, 소멸되기도 한다. 따라서 대기 중에 ppb 수준의 저농도로 존재하는 알데하이드 화합물의 측정은 대기 중 탄화수소의 cycles, PANs을 포함한 oxidant의 형성, 에어로졸 형성 및 침적에 의한 유기물 제거 과정을 이해하는데 중요한 의의를 지닌다(이병길, 2007). 또한 알데하이드 화합물은 분자구조, 용해성 화학적 반응성, 독성 등이 각기 다른 특성을 가지고 있다. 그리고 여러 종류의 알데하이드가 수용성이고 반응성이 크기 때문에 상기도 호흡기계의 점막이나 시신경, 지부 등을 자극하는 것으로 알려져 있다(WHO, 1995).

특히, 아세트알데하이드는 돌연변이원성 물질로 반응성이 매우 크기 때문에 점막을 자극하고 중추신경계에 마취작용을 일으킨다, 그리고 낮은 농도에서는 기관지염증 뿐만 아니라 눈, 코, 상부호흡기의 자극을 유발하며, 고농도에서는 두통, 마비, 기관지 및 폐의 수종을 일으킨다. 또한 섭취 시에는 멀미, 구토, 설사, 혼수상태, 호흡기 장애 등을 유발한다. 일부국가에서는 자동차의 연료로서 가솔린 대신 메탄올, 에탄올 등을 첨가한 대체연료를 사용하기 때문에 배기가스 중 아세트알데하이드의 농도가 증가하고 있다(Jhang and Liyo, 1994; Williams and Grogjean, 1990; WHO, 1987).

환경부가 지정한 22종 악취물질 중 알데하이드 화합물은 5종 물질로 눈, 피부, 호흡기관에 자극을 주고, 피부발적, 기침, 폐수종, 세포괴사 등을 유발한다. 그리고 고농도로 노출 시 호흡기관을 마비시켜 사망에 이를 수도 있는 독성 및 발암성 물질로 보고되어 있다(이창원 등, 2012).

2.4.1 아세트알데하이드 농도

제주지역 양돈시설의 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 DNPH 카트리지를 이용하여 아세트알데하이드(Acetaldehyde, ACHO) 시료를 채취하여 분석하였고, 그 결과를 Table 18와 Figure 14에 나타내었다. 4개 농장에서 아세트알데하이드 성분은 육성돈사, 비육돈사에서 각각 76.27~110.09 ppb, 50.72~86.64 ppb의 농도 범위를 보였다. 그리고 이들 양돈시설 부지경계선에서 아세트알데하이드 농도는 3.82~6.03 ppb로 환경부 악취공정시험법 배출허용기준치 50 ppb보다 훨씬 못 미치는 수준으로 조사되었다.

아세트알데하이드 성분들을 농장별로 구분하여 비교한 결과, A 농장은 육성돈사와 비육돈사에서 각각 84.21, 74.26 ppb의 농도를 나타내었고, 부지경계선에서는 4.43 ppb로 돈사 내부보다 16.7~19.0배 감소하는 경향을 보였다.

B 농장에서 아세트알데하이드 농도는 육성돈사 81.42 ppb, 비육돈사 52.93 ppb로 나타났고, 이들 돈사 내부에서 배출된 아세트알데하이드 성분은 부지경계선에서 4.74 ppb로 배출원에서 11.2~17.2배 감소하는 것으로 확인되었다. C 농장의 육성돈사, 비육돈사에서는 76.27, 50.72 ppb의 농도로 B 농장과 유사한 농도 패턴을 보였고, 부지경계선은 3.82 ppb로 배출허용기준치 50 ppb보다 낮게 나타났다.

D 농장의 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 아세트알데하이드 농도는 각각 110.09, 86.64, 6.03 ppb로 다른 농장에 비해 돈사 내·외부에서 모두 농도가 높았다. 이들 돈사 내부에서 배출된 아세트알데하이드가 부지경계선에서 14.4~18.2배 감소하는 특징을 보였다.

위의 결과들을 종합해보면, 측정된 양돈장에서 아세트알데하이드 성분은 부지경계선에서 모두 악취공정시험법 배출허용기준치 50 ppb에 훨씬 못 미치는 수준을 나타내었다. 따라서 아세트알데하이드 성분은 양돈장에서 발생하는 악취물질이 아닌 것으로 추정된다.

Table 18. Concentrations of acetaldehyde for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	4.43±0.59	84.21±17.76	74.26±22.51	19.0	16.7
B	4.74±1.12	81.42±38.86	52.93±17.13	17.2	11.2
C	3.82±0.33	76.27±47.86	50.72±12.69	20.0	13.3
D	6.03±1.69	110.09±19.72	86.64±33.50	18.2	14.4

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

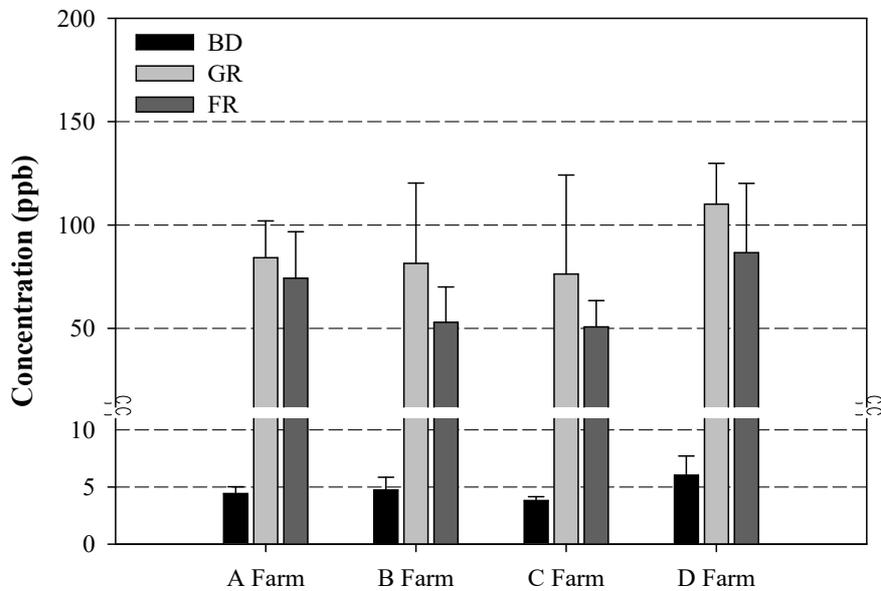


Figure 14. Comparison of acetaldehyde concentrations for four swine farms.

2.4.2 프로피온알데하이드 농도

프로피온알데하이드(Propionaldehyde, PCHO) 성분은 주로 자동차 배기가스, 화학공정, 담배연기, 음용수, 커피 등에서도 발생하는 물질로 노출시 호흡기, 피부, 눈점막 손상, 알레르기 등을 발생시킨다. 양돈시설에서 발생하는 프로피온알데하이드를 알아보기 위하여 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 시료를 채취하였고, 분석 결과는 Table 19와 Figure 15에서 상호 비교하였다. 측정된 양돈장에서 프로피온알데하이드 농도는 부지경계선에서 0.33~0.47 ppb, 육성돈사 3.03~6.47 ppb, 비육돈사 3.28~5.81 ppb의 범위를 보였다. 이 때 모든 농장의 돈사 내부와 부지경계선에서 발생한 프로피온알데하이드 농도는 악취공정법 배출허용기준치 50 ppb보다 낮은 농도를 보였고, 특히 부지경계선에서는 최소감지농도 1.0 ppb 미만인 것으로 조사되었다.

각 농장별로 발생한 프로피온알데하이드 농도를 비교한 결과, A 농장은 육성돈사 4.42 ppb, 비육돈사 5.12 ppb를 나타내었고, 이들 육성돈사와 비육돈사에서 배출되는 프로피온알데하이드의 농도는 부지경계선에서 0.35 ppb로 12.5~14.5배 감소하는 것으로 확인되었다.

B 농장의 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 프로피온알데하이드가 각각 3.03, 3.30, 0.33 ppb로 육성돈사와 비육돈사에서 비슷한 농도를 보였고, 이때 부지경계선은 최소감지농도 수준 미만으로 악취 발생에 영향이 미미한 것으로 판단된다. 그리고 C농장에서 육성돈사, 비육돈사에서 각각 4.04, 3.28 ppb의 농도를 보였고, 부지경계선에서는 0.42 ppb로 극미량의 농도를 나타내었다.

D 농장의 프로피온알데하이드 육성돈사 6.47 ppb, 비육돈사 5.81 ppb로 측정된 양돈시설 중 가장 높은 농도를 보였다. 그러나 이들 돈사에서 배출되는 프로피온알데하이드는 부지경계선 배출허용기준보다 낮은 것으로 나타났다. 그리고 부지경계선에서는 0.47 ppb로 배출허용기준과 최소감지농도(1.0 ppb)보다 낮은 것으로 조사되었다.

위 결과로부터 측정된 양돈시설 육성돈사와 비육돈사에서 프로피온알데하이드 농도는 악취공정시험법 배출허용기준치(50 ppb)미만으로 나타났고, 부지경계선에서는 최소감지농도보다 낮은 것으로 확인되었다. 따라서 프로피온알데하이드는 양돈장에서 발생하는 악취 물질이 아닌 것으로 사료된다.

Table 19. Concentrations of propionaldehyde for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.35±0.06	4.42±1.07	5.12±0.56	12.5	14.5
B	0.33±0.14	3.03±0.94	3.30±0.78	9.3	10.2
C	0.42±0.22	4.04±3.23	3.28±2.01	9.5	7.7
D	0.47±0.14	6.47±1.76	5.81±1.30	13.9	12.5

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

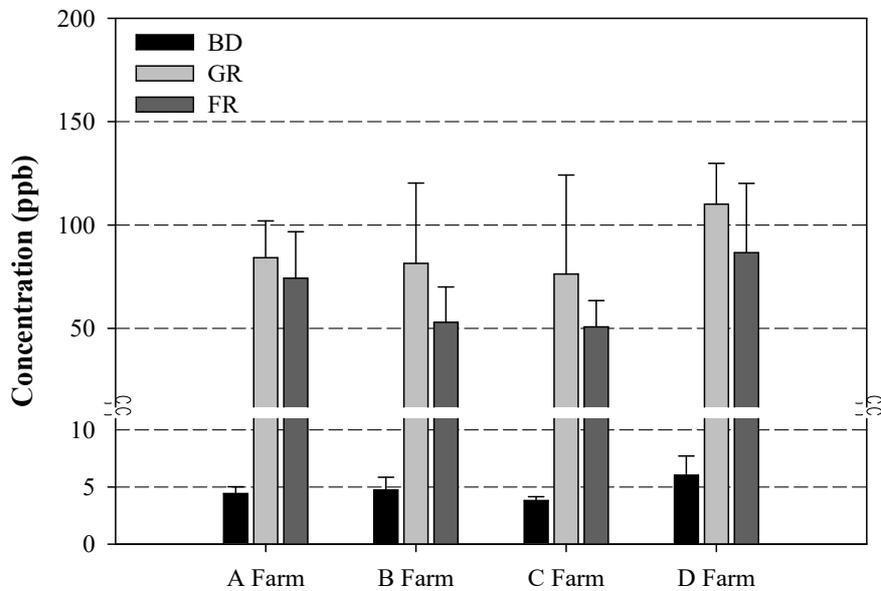


Figure 14. Comparison of acetaldehyde concentrations for four swine farms.

2.4.3 뷰틸알데하이드 농도

2018년 11월부터 12월동안 양돈장의 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 뷰틸알데하이드(Butyraldehyde, BCHO) 시료를 채취하였고, 그 결과를 Table 20과 Figure 16에 나타내었다. 뷰틸알데하이드 농도는 육성돈사 1.63~3.46 ppb, 비육돈사는 1.57~3.09 ppb의 범위를 보였고, A 농장의 육성돈사에서 3.36 ppb로 가장 높은 농도를 나타내었다. 부지경계선은 0.29~0.48 ppb로 환경부 악취공정법 배출허용기준치 29 ppb와 뷰틸알데하이드 최소감지농도 0.67 ppb보다 농도가 낮은 것으로 조사되었다.

뷰틸알데하이드 성분을 각 농장별로 구분하여 상호 비교한 결과에서 A 농장은 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선이 각각 3.46, 2.21, 0.43 ppb로 돈사 내·외부 모두 악취공정법 배출허용기준보다 낮은 농도 수준을 보였다. B 농장은 뷰틸알데하이드가 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 각각 1.63 ppb, 2.11 ppb, 0.29 ppb의 농도를 나타내었다.

C 농장에서 뷰틸알데하이드 농도는 육성돈사 2.21 ppb, 비육돈사 1.57 ppb, 부지경계선에서는 0.43 ppb를 보였고, D 농장은 2.74, 3.09, 0.48 ppb로 C, D 농장의 돈사 내·외부의 뷰틸알데하이드 농도가 환경부 악취공정법 배출허용기준치보다 낮은 것으로 확인되었다.

위 결과로부터 측정된 양돈시설들의 부지경계선에서 뷰틸알데하이드 최소감지농도보다 낮았고, 악취공정시험법 배출허용기준치 미만으로 조사되었다. 따라서 뷰틸알데하이드는 양돈장에서 발생하는 악취물질이 아닌 것으로 판단된다.

Table 20. Concentrations of butyraldehyde for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.43±0.06	3.46±0.63	2.21±0.62	8.1	5.2
B	0.29±0.19	1.63±0.63	2.11±0.64	5.6	7.3
C	0.43±0.30	2.21±1.70	1.57±1.45	5.2	3.7
D	0.48±0.14	2.74±0.76	3.09±1.50	5.7	6.5

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

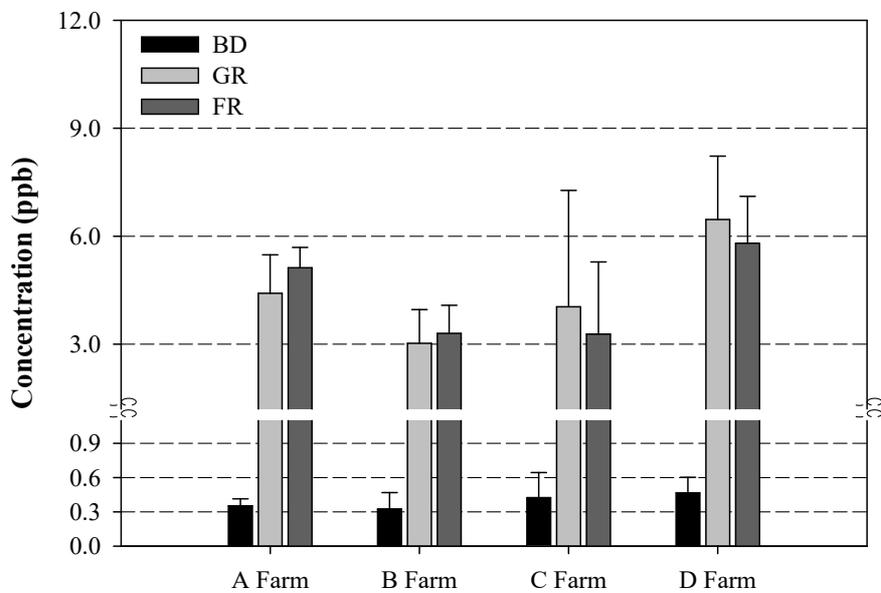


Figure 15. Comparison of propionaldehyde concentrations for four swine farms.

2.4.4 *iso*-발레르알데하이드 농도

자동차 가속 시 배기가스에서 주로 발생하는 것으로 알려진 *iso*-발레르알데하이드(*iso*-Valeraldehyde, *iso*-VCHO) 성분의 양돈시설 발생량을 알아보기 위하여 돈사 내·외부에서 각각 시료를 채취하였고, 그 결과를 Table 21과 Figure 17에 나타내었다. *iso*-발레르알데하이드 농도는 육성돈사 0.96~3.90 ppb, 비육돈사 0.74~3.29 ppb의 범위를 보였고, 이 중 A 농장의 육성돈사에서 3.90 ppb로 가장 높은 농도를 보였다. 그리고 부지경계선에서 *iso*-발레르알데하이드 성분은 모든 양돈장에서 불검출로 조사되었다.

농장별로 구분하여 *iso*-발레르알데하이드의 농도를 비교해 본 결과에서 A 농장은 육성돈사 3.90 ppb, 비육돈사 3.29 ppb로 비슷한 수준을 보였고, B 농장에서 육성돈사, 비육돈사 각각 1.76, 2.58 ppb로 비육돈사에서 다소 높게 나타났다.

C 농장의 육성돈사, 비육돈사에서는 *iso*-발레르알데하이드 농도가 각각 2.01, 1.56 ppb로 A 농장과 유사한 농도 패턴을 보였고, D 농장의 육성돈사는 0.96 ppb, 비육돈사에서 0.74 ppb의 농도를 나타내었다.

또한 모든 양돈시설에서 *iso*-발레르알데하이드 성분은 부지경계선에서 불검출되었고, 그 이유는 돈사 내부에서 배출된 *iso*-발레르알데하이드 성분이 대기 중에서 빠르게 분해된 것으로 추정된다. 이러한 결과로부터 *iso*-발레르알데하이드 성분은 양돈장에서 발생하는 악취물질이 아닌 것으로 사료된다.

Table 21. Concentrations of *iso*-valeraldehyde for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	N.D.	3.90±0.87	3.29±0.34	-	-
B	N.D.	1.76±0.14	2.58±0.54	-	-
C	N.D.	2.01±1.60	1.56±1.56	-	-
D	N.D.	0.96±0.33	0.74±0.33	-	-

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room, N.D. : Not Detected

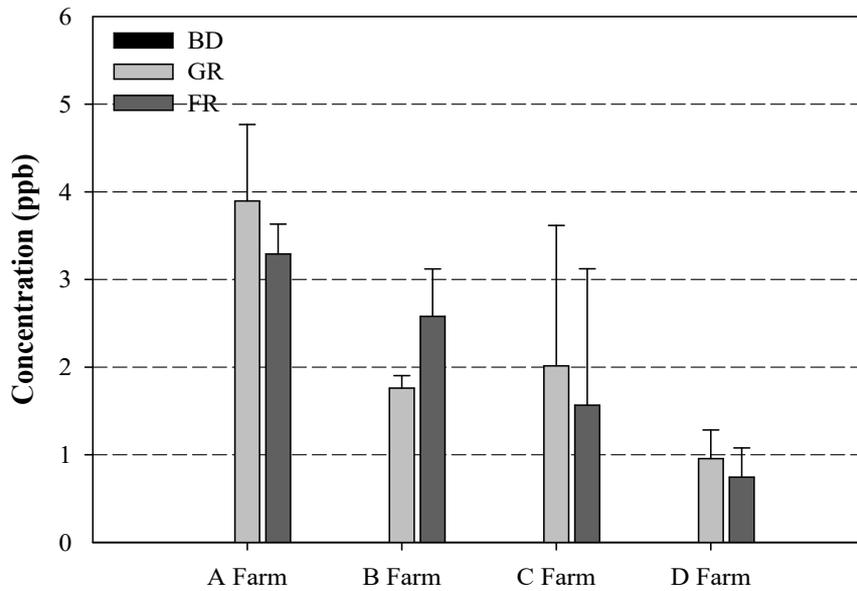


Figure 17. Comparison of *iso*-valeraldehyde concentrations for four swine farms.

2.4.5 *n*-발레르알데하이드 농도

n-발레르알데하이드(*n*-Valeraldehyde, *n*-VCHO)성분은 *iso*-발레르알데하이드와 함께 자동차 배기가스에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있다. *n*-발레르알데하이드 성분을 양돈장의 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 각각 시료를 채취하였고, 분석 결과를 Table 22와 Figure 18에 나타내었다. *n*-발레르알데하이드 농도는 육성돈사에서 0.33~0.96 ppb, 비육돈사는 0.19~0.98 ppb로 돈사 내부 농도는 악취공정법 배출허용기준치 9 ppb보다 낮은 것으로 나타났다. 그리고 부지경계선 또한 *n*-발레르알데하이드 성분은 모든 농장에서 불검출로 확인되었다.

n-발레르알데하이드 성분을 각 농장별로 구분하여 비교한 결과, A 농장은 육성돈사, 비육돈사가 각각 0.33, 0.82 ppb의 농도를 보였고, B 농장은 0.63, 0.98 ppb로 두 농장의 돈사 내부에서 *n*-발레르알데하이드 농도 수준은 환경부 배출허용기준치보다 낮은 것으로 조사되었다.

C 농장의 *n*-발레르알데하이드 농도는 육성돈사 0.54 ppb, 비육돈사 0.19 ppb이고, D 농장은 육성돈사에서 0.96 ppb, 비육돈사는 0.74 ppb로 악취공정법 배출허용기준보다 낮았다.

n-발레르알데하이드 성분은 부지경계선에서 측정한 양돈시설 모두 불검출로 조사되었고, 이는 *n*-발레르알데하이드 물질이 양돈시설에서 발생하는 악취 물질이 아닌 것으로 사료된다.

위의 결과들을 종합해 보면, 아세트알데하이드, 프로피온알데하이드, 뷰틸알데하이드, *iso*-발레르알데하이드, *n*-발레르알데하이드 성분들은 돈사 내부에서 환경부 악취공정법 배출허용기준치보다 낮았고, 부지경계선에서는 아세트알데하이드 성분을 제외한 나머지 성분들이 불검출로 확인되었다. 따라서 알데하이드 화합물들은 양돈시설에서 발생하는 악취 물질이 아닌 것으로 추정된다.

Table 22. Concentrations of *n*-valeraldehyde for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	N.D.	0.33±0.09	0.82±0.19	-	-
B	N.D.	0.63±0.18	0.98±0.47	-	-
C	N.D.	0.54±0.54	0.19±0.06	-	-
D	N.D.	0.96±0.33	0.74±0.33	-	-

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room, N.D. : Not Detected

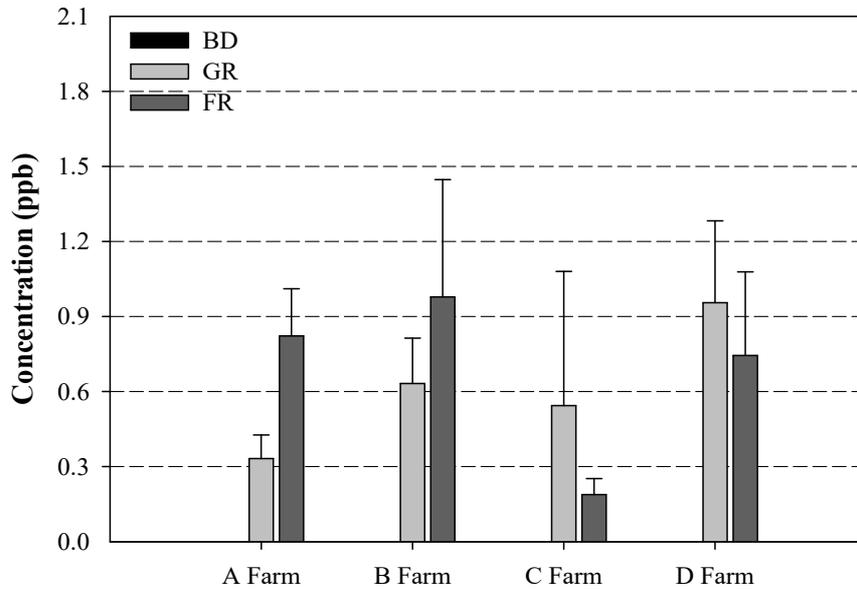


Figure 18. Comparison of *n*-valeraldehyde concentrations for four swine farms.

2.5 휘발성 유기화합물

대기 중 대표적 유해물질인 휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds, VOCs)은 대기 오염을 판단하는 중요한 기준으로 활용되고 있다. 휘발성 유기화합물들은 aldehyde, ketone, hydrocarbon과 같이 탄소기반으로 구성되어 있는 성분들을 포함하고 있다(Ahn *et al.*, 2011). 이러한 휘발성 유기화합물의 배출원으로는 자동차, 공업시설, 전자제품 등의 생산과 취급을 포괄하는 인위적인 배출원에서 발생한다. 환경 대기에 존재하는 휘발성 유기화합물은 대류권 내에서 질소화합물과의 광화학반응을 촉진시키기 때문에 오존을 생성하는 광화학반응의 요인으로 작용한다(Wang *et al.*, 2008; Delgado-Saborit and Esteve-Cano, 2008).

이들 성분들은 유기용매를 대량으로 사용하는 공단지역, 자동차 등 교통 배출원이 밀접한 도심 환경대기에서 그 농도가 증가하는 추세에 있다(Hung *et al.*, 1998). 또한 새집증후군과 같이 실내환경에 대한 관심이 증가하면서, VOCs성분이 실내 공기질을 판단하는데 중요한 지표로 활용되고 있다(Bernsten *et al.*,

2008; Haghghat and Huang, 2003; Bodalal *et al.*, 2000). 반면에 Isoprene (C_5H_8), monoterpenes ($C_{10}H_{16}$) 등의 휘발성 유기화합물은 식물에 의해 생성되어 다량으로 대기 중으로 배출된다(Komenda *et al.*, 2001). 전세계적으로 유기물에 의한 휘발성 유기화합물의 생성 및 배출은 전체 휘발성 유기화합물의 86% 정도를 차지하는 것으로 보고되고 있다(Fedele *et al.*, 2007). 특히 벤젠, 톨루엔, 자일렌 등을 비롯한 다양한 방향족 휘발성 유기화합물 성분들은 환경학적으로 중요한 의미를 가지고 있으며, 현재 인체 유해성에 대해서는 명확히 알려지지 않았다. 그러나 benzene, 1,3-butadiene 등과 같은 몇몇 성분들은 인체나 동식물에 축적으로 생식기능의 손상, 암 발생 등과 같이 인체에 심각한 부작용을 나타나는 것으로 보고되고 있다(Liu *et al.*, 2008; Hoshi *et al.*, 2008).

환경부에서는 일부 휘발성 유기화합물을 악취물질로 지정하여 관리하고 있다. 지정악취물질 중 휘발성 유기화합물은 2005년부터 Styrene 성분 지정을 시작으로 2008년에 Toluene, Xylene, Methyl ethyl ketone, Methyl isobutyl acetate, 2010년에 *iso*-Butyl alcohol 성분을 추가하여 현재 악취물질을 관리하고 있다.

2.5.1 스타이렌 농도

제주지역 4개 양돈장에서 스타이렌(Styrene, STR)의 발생량을 파악하기 위하여 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 시료를 채취하였고, 분석 결과를 Table 23과 Figure 19에 상호 비교하였다. 스타이렌은 측정된 양돈시설에서 농도가 육성돈사 0.13~0.34 ppb, 비육돈사 0.15~0.16 ppb, 부지경계선 0.11~0.13 ppb의 범위를 나타내었다. 이들 돈사 내·외부에서 농도수준은 환경부 악취공정법 배출허용기준 400 ppb와 최소감지농도 35 ppb에 비해 훨씬 낮은 것으로 확인되었다.

스타이렌 성분을 각 농장별로 구분하여 비교한 결과에서 A 농장의 육성돈사는 0.14 ppb, 비육돈사에서는 0.15 ppb의 농도를 보였고, 부지경계선은 0.11로 돈사 내부와 유사한 농도 수준을 나타내었다.

B 농장에서 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선의 스타이렌 농도는 각각 0.14, 0.16, 0.12 ppb이었고, C 농장은 0.13, 0.16, 0.12 ppb로 두 양돈시설은 A 농장과 비슷한 농도 패턴을 보였다. 그리고 D 농장에서는 육성돈사 0.34 ppb, 비육돈사 0.15 ppb, 부지경계선 0.13 ppb의 스타이렌 농도를 보였으나, 최소감지농도에는

훨씬 미치지 못하는 수준인 것으로 조사되었다.

위 결과로부터 스타이렌은 양돈장 내·외부에서 최소감지농도(35 ppb)보다 훨씬 낮은 것으로 확인되었다. 따라서 스타이렌 성분은 양돈장에서 발생하는 악취 물질이 아닌 것으로 사료된다.

Table 23. Concentrations of styrene for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.11±0.12	0.14±0.16	0.15±0.15	1.3	1.4
B	0.12±0.11	0.14±0.13	0.16±0.15	1.2	1.3
C	0.12±0.11	0.13±0.12	0.16±0.16	1.1	1.4
D	0.13±0.12	0.34±0.35	0.15±0.16	2.7	1.2

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

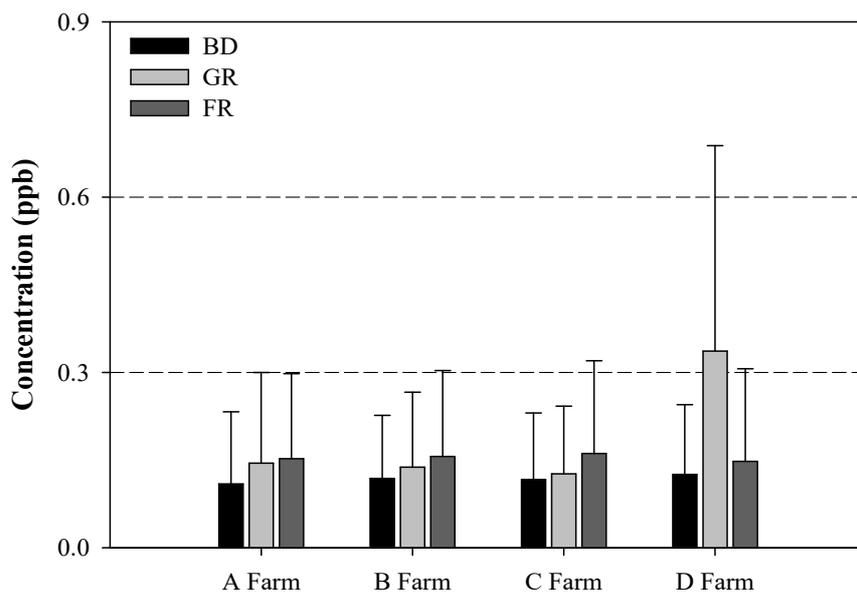


Figure 19. Comparison of styrene concentrations for four swine farms.

2.5.2 톨루엔 농도

톨루엔(Toluene, TOL)은 고체흡착관(Tenax)를 이용하여 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 시료를 채취하였고, 그 분석 결과를 Table 24와 Figure 20에서 상호 비교하였다. 톨루엔은 육성돈사 0.04~0.60 ppb, 비육돈사 0.07~0.36 ppb의 농도 범위를 보였고, D 농장의 육성돈사에서 농도가 가장 높았다. 그리고 부지경계선에서 톨루엔 농도는 0.03~0.08 ppb로 환경부 악취공정법 배출허용기준치 10 ppm보다 훨씬 낮았고, 이들 농도는 최소감지농도 330 ppb미만으로 확인되었다.

각 농장별로 톨루엔 농도를 비교한 결과, A 농장은 육성돈사와 비육돈사에서 각각 0.15 ppb, 0.36 ppb의 농도를 나타내었고, 이들 돈사로부터 배출된 톨루엔은 부지경계선에서 0.05 ppb 농도를 보였다. B 농장의 육성돈사에서 톨루엔의 농도는 0.04 ppb, 비육돈사는 0.07 ppb로 이들 두 돈사의 농도는 최소감지농도보다 낮았고, 부지경계선 또한 0.03 ppb로 최소감지농도에 미치지 못하는 것으로 조사되었다.

C 농장에서 톨루엔은 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 각각 0.10, 0.23, 0.08 ppb의 농도를 나타내었다. 그리고 D 농장은 육성돈사에서 톨루엔 농도가 0.60 ppb, 비육돈사는 0.29 ppb를 보였고, 부지경계선에서는 0.07 ppb로 돈사 내·외부 모두 최소감지농도 330 ppb보다 훨씬 낮은 것으로 확인되었다.

따라서 톨루엔 성분은 모든 양돈시설의 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 악취공정법 배출허용기준치(10 ppm)보다 낮았고, 톨루엔 최소감지농도 미만으로 확인되었다. 이러한 결과로부터 톨루엔 성분은 양돈장에서 배출되는 주요 악취물질이 아닌 것으로 추정된다.

Table 24. Concentrations of toluene for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.05±0.03	0.15±0.10	0.36±0.27	3.1	7.3
B	0.03±0.02	0.04±0.01	0.07±0.08	1.4	2.5
C	0.08±0.08	0.10±0.03	0.23±0.23	1.2	2.7
D	0.07±0.02	0.60±0.88	0.29±0.19	8.2	4.0

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

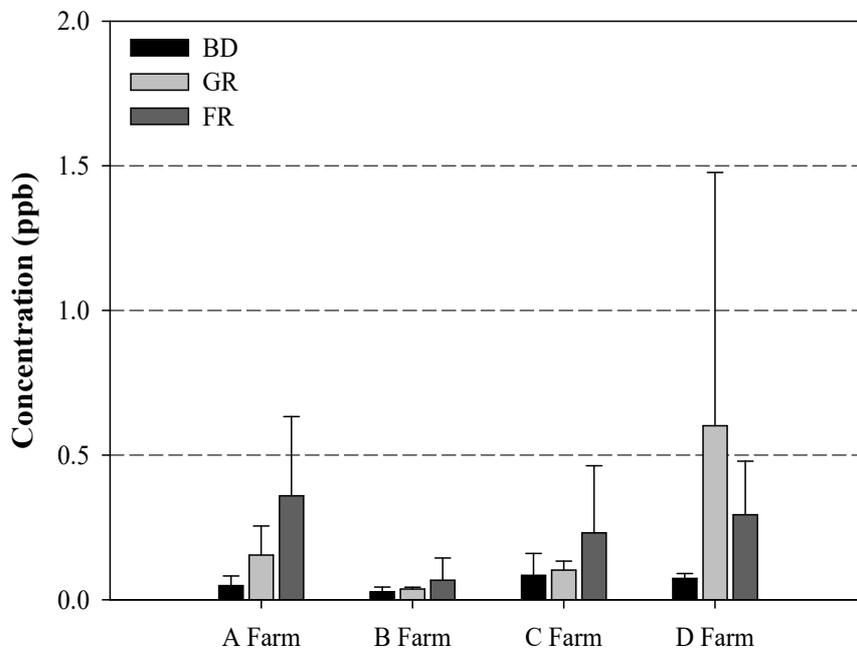


Figure 20. Comparison of toluene concentrations for four swine farms.

2.5.3 자일렌 농도

2018년 11월부터 12월에 제주지역 양돈장의 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 자일렌(Xylene, XYL) 시료를 채취하였고, 분석 결과를 Table 25과 Figure 21에 나타내었다. 자일렌의 농도는 육성돈사에서 0.06~0.48 ppb, 비육돈사는 0.11~0.18 ppb로 돈사 내부 농도는 악취공정법 배출허용기준치 1.0 ppm에 훨씬 미치지 못하는 것으로 나타났다. 또한 부지경계선의 농도수준은 0.05~0.07 ppb로 자일렌 최소감지농도 160 ppb보다 낮은 것으로 확인되었다.

각 농장별로 구분하여 자일렌의 농도를 비교한 결과, A 농장은 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선이 각각 0.08, 0.11, 0.02 ppb로 나타났고, 돈사 내·외부 모두 배출허용기준보다 낮은 것으로 조사되었다. B 농장에서는 자일렌 농도가 육성돈사와 비육돈사에서 0.05, 0.08 ppb이었고, 이때 부지경계선 0.04 ppb로 최소감지농도에도 훨씬 미치지 못하는 것으로 조사되었다.

C 농장의 자일렌 농도는 육성돈사 0.06 ppb, 비육돈사 0.11 ppb이었고, 부지경계선에서는 0.06 ppb로 돈사 내부와 외부의 농도수준이 유사한 것으로 나타났다. 그리고 D 농장에서 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선의 자일렌 농도는 각각 0.30, 0.13, 0.06 ppb를 보였다.

자일렌 성분은 측정한 양돈장의 부지경계선에서 모두 악취공정시험법 배출허용기준치(1.0 ppm)와 최소감지농도(160 ppb)보다 훨씬 낮은 것으로 조사되었다.

Table 25. Concentrations of xylene for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.05±0.06	0.08±0.08	0.11±0.12	1.5	2.2
B	0.04±0.05	0.05±0.06	0.08±0.11	1.2	1.8
C	0.06±0.05	0.06±0.07	0.11±0.16	1.1	1.9
D	0.06±0.07	0.30±0.48	0.13±0.18	5.0	2.2

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

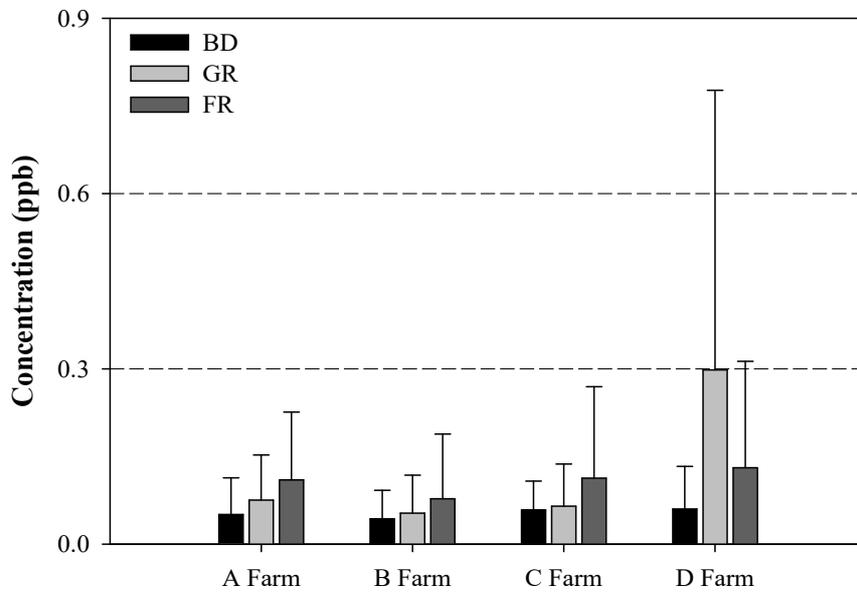


Figure 21. Comparison of xylene concentrations for four swine farms.

2.5.4 메틸에틸케톤 농도

메틸에틸케톤(Methyl ethyl ketone, MEK)은 고체흡착관을 이용하여 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 시료를 채취하였고, 그 분석 결과를 Table 26와 Figure 22에 나타내었다. 메틸에틸케톤은 육성돈사와 비육돈사에서 각각 1.70~4.19 ppb, 1.29~2.79 ppb의 농도범위를 보였다. 그리고 부지경계선에서 메틸에틸케톤 농도는 0.32~0.83 ppb로 환경부 악취공정시험법 배출허용기준치 13 ppm보다 훨씬 낮게 나타났으며, 이들 농도수준은 메틸에틸케톤 최소감지농도인 440 ppb보다 낮은 것으로 조사되었다.

메틸에틸케톤 농도를 농장별로 구분하여 상호 비교한 결과, A 농장은 육성돈사와 비육돈사에서 각각 4.19 ppb, 2.57 ppb의 농도를 나타내었고, 이들 돈사 내부에서 배출된 메틸에틸케톤은 부지경계선에서 0.50 ppb로 5.2~8.5배 감소하는 경향을 보였다. B 농장의 육성돈사에서 메틸에틸케톤 농도는 1.95 ppb, 비육돈사는 2.31 ppb로 이들 두 돈사의 농도는 최소감지농도보다 낮았고, 부지경계선에서도 0.83 ppb로 최소감지농도보다 낮은 것으로 조사되었다.

C 농장에서 메틸에틸케톤 성분은 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 각각 1.70, 1.29, 0.54 ppb의 농도를 나타내었다. 그리고 D 농장은 육성돈사에서 메틸에틸케톤 농도가 3.14 ppb, 비육돈사는 2.79 ppb로 두 돈사에서 비슷한 농도를 보였고, 부지경계선에서는 메틸에틸케톤 농도가 0.54 ppb로 돈사 내·외부에서 최소감지농도 440 ppb보다 훨씬 낮은 것으로 조사되었다.

따라서 메틸에틸케톤성분은 모든 양돈시설의 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 모두 악취공정법 배출허용기준치(13ppm)과 최소감지농도(440 ppb)보다 훨씬 낮은 농도로 양돈장에서 발생하는 악취 물질이 아닌 것으로 추정된다.

Table 26. Concentrations of methyl ethyl ketone for four swine farms.

Farm	MEK concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.50±0.36	4.19±1.61	2.57±0.77	8.5	5.2
B	0.83±0.48	1.95±0.43	2.31±0.78	2.3	2.8
C	0.32±0.20	1.70±0.41	1.29±0.86	5.3	4.0
D	0.54±0.46	3.14±2.03	2.79±2.20	5.8	5.2

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

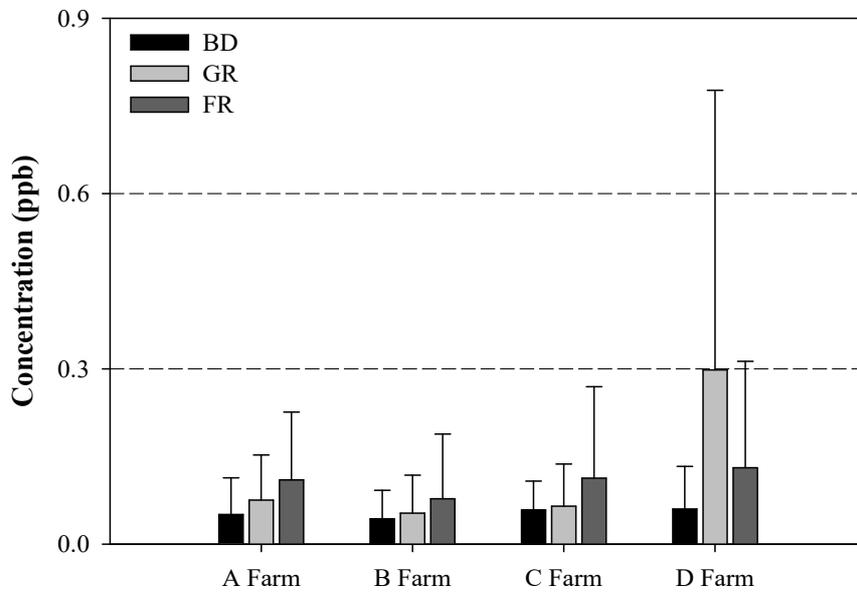


Figure 22. Comparison of methyl ethyl ketone concentrations for four swine farms.

2.5.5 메틸 *iso*-뷰틸케톤 농도

제주지역 4개의 양돈장을 대상으로 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 고체흡착관(Tenax)을 이용하여 메틸 *iso*-뷰틸케톤(Methyl *iso*-butyl ketone, MIBK) 시료를 채취하였고, 그 결과를 Table 27과 Figure 23에 나타내었다. 메틸 *iso*-뷰틸케톤의 농도는 육성돈사에서 0.03~0.04 ppb, 비육돈사는 0.03~0.10 ppb로 환경부 악취공정법 배출허용기준치 1.0 ppm에 훨씬 못 미치는 것으로 조사되었다. 그리고 부지경계선에서는 0.01~0.03 ppb의 농도 범위로 메틸 *iso*-뷰틸케톤의 최소감지농도 170 ppb보다 낮은 것으로 확인되었다.

각 농장별로 메틸 *iso*-뷰틸케톤 농도를 비교한 결과, A 농장은 육성돈사, 비육돈사, 부지경계에서 *iso*-뷰틸케톤 농도가 각각 0.14, 0.15, 0.02 ppb로 육성돈사와 비육돈사에서 유사한 농도를 보였다. 그러나 부지경계선을 포함하여 돈사 내부의 농도는 악취공정법 배출허용기준보다 훨씬 낮은 것으로 조사되었다. B 농장에서 메틸 *iso*-뷰틸케톤 농도는 육성돈사와 비육돈사에서 각각 0.04, 0.05 ppb 이었고, 부지경계선에서는 0.04 ppb로 최소감지농도보다 낮은 것으로 조사되었다

C농장의 메틸 *iso*-뷰틸케톤 농도는 육성돈사에서 0.08 ppb, 비육돈사 0.09 ppb, 부지경계선에서 0.04 ppb의 농도를 나타내었고, D 농장은 각각 0.07, 0.12, 0.04 ppb로 두 농장 돈사 내·외부 모두 메틸 *iso*-뷰틸케톤 농도가 환경부 악취공정법 배출허용기준치보다 낮은 것으로 확인되었다.

따라서 4개 양돈장의 돈사 내·외부 모두 메틸 *iso*-뷰틸케톤 농도가 악취공정법 배출허용기준치(1.0 ppm)과 최소감지농도보다 낮은 농도를 보였고, 이를 통해 메틸 *iso*-뷰틸케톤이 양돈장이 발생원이 아닌 것으로 사료된다.

Table 27. Concentrations of methyl *iso*-butyl ketone for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.03±0.03	0.14±0.09	0.15±0.10	4.3	4.6
B	0.02±0.01	0.04±0.03	0.05±0.03	2.4	2.6
C	0.04±0.03	0.08±0.04	0.09±0.05	2.0	2.4
D	0.04±0.03	0.07±0.07	0.12±0.08	1.5	2.7

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

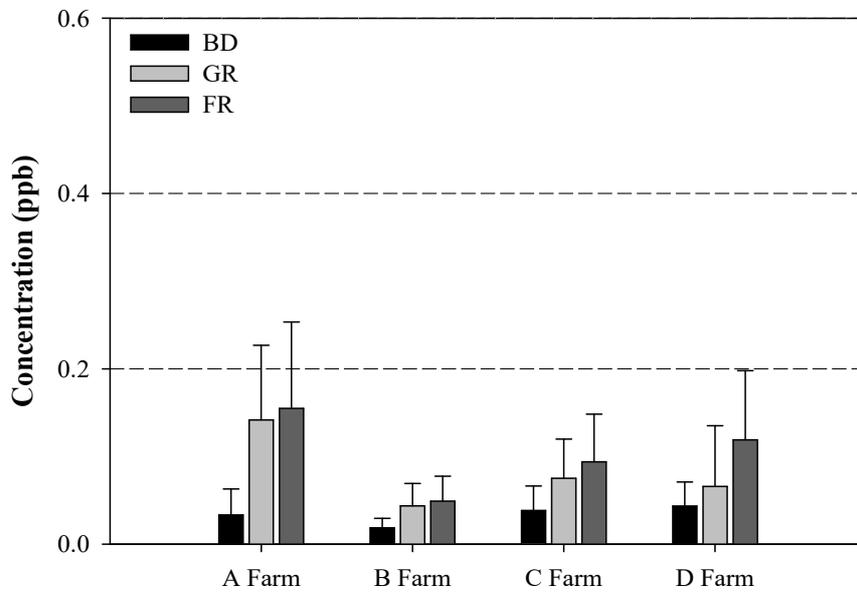


Figure 23. Comparison of methyl *iso*-butyl ketone concentrations for four swine farms.

2.5.6 뷰틸아세테이트 농도

사육규모가 유사한 4개의 양돈장에서 돈사 내·외부를 구분하여 뷰틸아세테이트(Butyl acetate, BuAc) 성분을 채취하여 분석하였고, 그 결과를 Figure 24와 Table 28에 나타내었다. 양돈장 내부인 육성돈사와 비육돈사에서 뷰틸아세테이트의 농도가 육성돈사에서 0.07~0.24 ppb의 범위를 보였고, 비육돈사는 0.07~0.09 ppb로 조사되었다. 그리고 부지경계선은 0.06~0.07 ppb로 측정 양돈장에서 모두 비슷한 농도 수준을 나타내었고, 이들 돈사 내·외부의 농도는 환경부 악취공정법 배출허용기준치(1.0 ppm)과 최소감지농도(16 ppb)보다 낮은 것으로 조사되었다.

각 농장별로 뷰틸아세테이트 농도를 비교한 결과, A 농장은 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 각각 0.07, 0.09, 0.07 ppb를 나타내었고, B농장에서 0.08, 0.09, 0.07 ppb로 돈사 내·외부에서 비슷한 수준의 농도를 보였다. 그리고 C 농장은 육성돈사 0.07 ppb, 비육돈사 0.08 ppb, 부지경계선은 0.06 ppb로 A, B 농장의 농도 패턴과 유사한 것으로 조사되었다.

D 농장에서는 뷰틸아세테이트 농도가 육성돈사와 비육돈사에서 각각 0.24, 0.07 ppb를 보였고, 이때 육성돈사의 농도 수준은 측정한 양돈시설 중 가장 높았지만, 악취공정법 배출허용기준보다 훨씬 낮은 것으로 조사되었다. 그리고 부지경계선에서 뷰틸아세테이트 농도는 0.07 ppb로 다른 농장들과 비슷한 수준으로 나타났다.

위의 결과들을 종합해보면, 양돈시설의 돈사 내·외부의 뷰틸아세테이트 농도 수준이 악취공정법 배출허용기준(1.0 ppm)와 최소감지농도(16 ppb) 미만으로 뷰틸아세테이트 성분은 양돈시설에서 발생하는 물질이 아닌 것으로 판단된다.

Table 28. Concentrations of butyl acetate for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.07±0.08	0.07±0.07	0.09±0.09	1.0	1.3
B	0.07±0.07	0.08±0.08	0.09±0.09	1.2	1.3
C	0.06±0.07	0.07±0.08	0.08±0.09	1.1	1.3
D	0.07±0.08	0.24±0.14	0.07±0.08	3.6	1.0

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

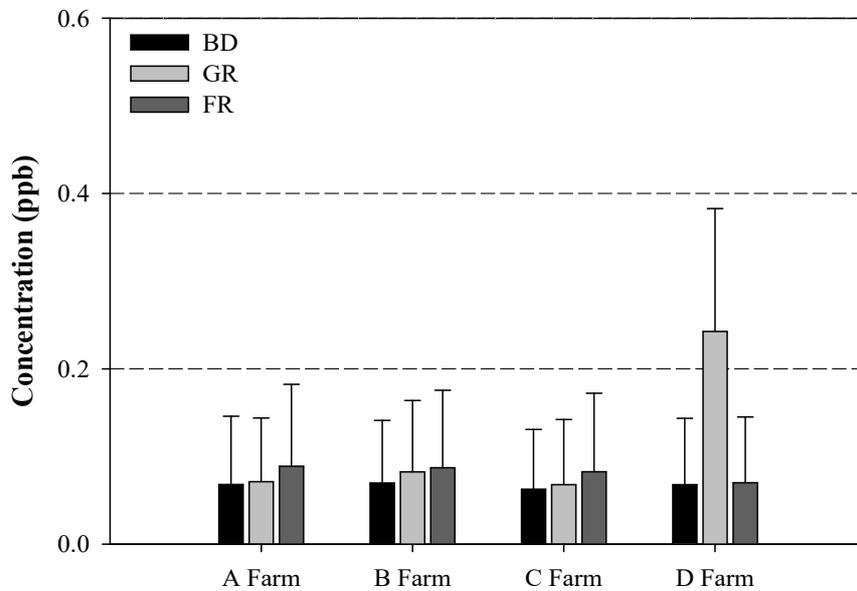


Figure 24. Comparison of butyl acetate concentrations for four swine farms.

2.5.7 *iso*-부틸알코올 농도

iso-부틸알코올(*iso*-Butyl alcohol, *iso*-BuAl) 성분이 양돈장에서 발생량을 파악하기 위하여 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 시료를 채취하였고, 분석 결과를 Table 29과 Figure 25에 상호 비교하였다. *iso*-부틸알코올은 육성돈사와 비육돈사 농도는 각각 0.11~0.37 ppb, 0.13~0.30 ppb의 범위를 보였고, 이들 두 돈사의 농도수준은 최소감지농도 11 ppb보다 훨씬 낮은 것으로 나타났다. 그리고 부지경계선에서는 불검출~0.04 ppb로 환경부 악취공정법 배출허용기준(900 ppb)과 최소감지농도(11 ppb)비해 농도가 훨씬 낮은 것으로 조사되었다.

iso-부틸알코올 농도를 농장별로 상호 비교한 결과, A 농장의 육성돈사 0.37 ppb, 비육돈사가 0.14 ppb를 나타내었고, 부지경계선의 *iso*-부틸알코올 성분은 불검출로 나타났다. B 농장에서 *iso*-부틸알코올 농도는 육성돈사 0.11 ppb, 비육돈사 0.18 ppb, 부지경계선 0.04 ppb로 이 때 부지경계선의 *iso*-부틸알코올 농도수준은 최소감지농도 11 ppb보다 낮은 것으로 조사되었다.

C 농장의 육성돈사, 비육돈사에서 *iso*-부틸알코올 농도는 각각 0.11, 0.13 ppb 이었고, D 농장은 각각 0.35, 0.30 ppb로 조사되었다. 또한 C, D 농장의 부지경계선에서는 *iso*-부틸알코올이 불검출로 조사되었다. 따라서 *iso*-부틸알코올은 양돈 시설 내·외부에서 최소감지농도에도 훨씬 미치지 못하는 것으로 조사되었다.

위의 결과들로부터 스타이렌, 톨루엔, 자일렌, 메틸에틸케톤, 메틸 *iso*-부틸케톤, 부틸아세테이트, *iso*-부틸알코올 성분들은 측정된 양돈시설 내·외부에서 모두 환경부 악취공정법 배출허용기준치보다 낮았다. 그리고 각 성분들의 최소감지농도에도 훨씬 미치지 못하는 것으로 조사되었다. 따라서 휘발성 유기화합물들은 양돈시설에서 발생하는 악취물질이 아닌 것으로 사료된다.

Table 29. Concentrations of *iso*-butyl alcohol for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	N.D.	0.37±0.22	0.14±0.07	-	-
B	0.04±0.03	0.11±0.09	0.18±0.10	2.4	4.1
C	N.D.	0.11±0.05	0.13±0.09	-	-
D	N.D.	0.35±0.25	0.30±0.22	-	-

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room, N.D. : Not Detected

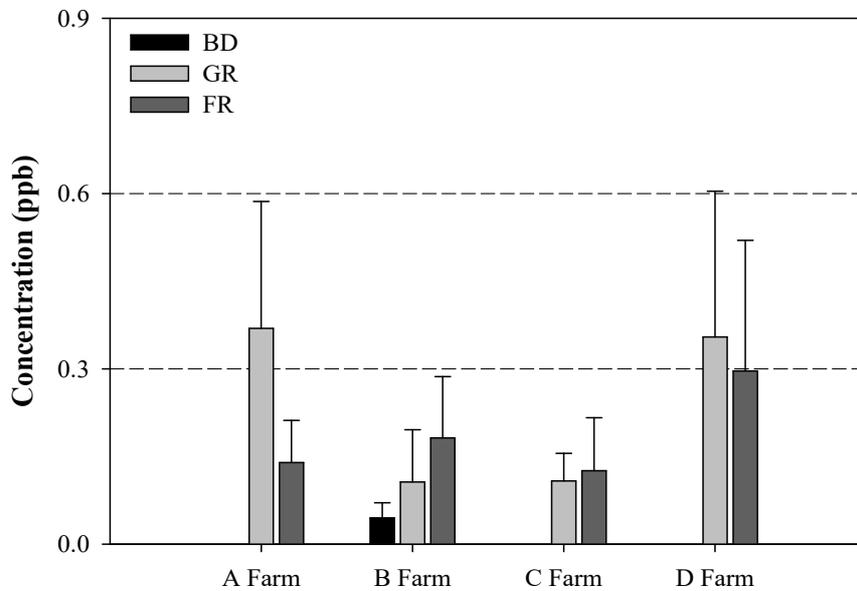


Figure 25. Comparison of *iso*-butyl alcohol concentrations for four swine farms.

2.6 휘발성 저급지방산

유기지방산은 탄소 수가 C2~C6인 저분자량의 카르복실산으로 대기압에서 쉽게 기화되기 때문에 volatile acids라고도 불린다. 이들은 물에 대한 용해도가 비교적 높고 보통 상온에서 액상으로 존재한다(Spina *et al.*, 2007; Sawyer *et al.*, 2003; Cruwys *et al.*, 2002). 지방산은 유기체의 생물학적 혐기성 분해 과정에서 생성되기 때문에 하수처리장, 활성슬러지, 쓰레기 매립장 침출수, 동물의 배설물, 유기체의 부패, 생활폐수 등에서 주로 배출된다(Yun and Ohta, 2005; Lie and Welander, 1997). 휘발성 저급지방산 중 formic acid, acetic acid, propionic acid는 자극적인 냄새, butyric acid와 valeric acid는 역겨운 냄새를 유발하며, 특히 butyric acid는 부패된 버터에서 발생하는 악취물질로 알려져 있다(Sawyer *et al.*, 2003). 이 중 propionic acid, *n*-butyric acid, *iso*-valeric acid, *n*-valeric acid 4종은 악취를 유발하는 대표적인 휘발성 저급지방산(volatile fatty acid, VFAs)이며, 2010년부터 지정악취물질로 지정되어 관리되고 있다. 이들 휘발성 저급지방산은 매우 낮은 최소감지농도를 가진 물질로서 악취공정시험법에서 배출허용기준도 수 ppmv 정도로, 환경학적으로 미량으로도 악취오염을 유발하는 주요 물질로 알려져 있다(Miller and Varel *et al.*, 2003).

양돈시설에서 배출되는 휘발성 저급지방산은 분뇨 및 사료의 부패로 인하여 이들에 포함된 탄수화물과 단백질이 분해되면서 아미노산의 탈아미노화(deamination) 반응에 의해 발생한다. 그리고 분뇨에서 발생하는 휘발성 저급지방산 중 약 60% 정도는 acetic acid 성분이고, 나머지 성분들은 propionic acid, *n*-butyric acid, *iso*-valeric acid, *n*-valeric acid 등으로 알려져 있다. 이 중 acetic acid, propionic acid, *n*-butyric acid은 탄수화물 발효로, *iso*-valeric acid, *n*-valeric acid와 같은 이성체 지방산은 주로 단백질에서 유래한 것으로 보고되고 있다(이강훈 등, 2012; 이은영과 임정수, 2010; Spoelstra, 1980; Cooper and cornforth, 1978; McGill and Jackson, 1977).

본 연구에서는 2010년에 지정악취물질로 새롭게 추가된 propionic acid (PA), *n*-butyric acid (*n*-BA), *iso*-valeric acid (*iso*-VA), *n*-valeric acid (*n*-VA) 4종의 휘발성 저급지방산(VFAs) 시료를 채취하여 분석하였다.

2.6.1 프로피온산 농도

제주지역 양돈장의 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 프로피온산(Propionic acid, PA) 시료를 채취하여 분석한 결과를 Table 30과 Figure 26에 나타내었다. 프로피온산은 부지경계선 31.22~57.11 ppb, 육성돈사 199.10~841.31 ppb, 비육돈사 302.60~420.12 ppb의 농도 범위를 보였다. 그리고 측정한 모든 농장의 부지경계선에서 프로피온산 농도는 환경부 악취공정법 배출허용기준치 30 ppb를 초과하는 것으로 조사되었다.

프로피온산 성분을 농장별로 구분하여 비교한 결과, A 농장은 육성돈사에서 355.26 ppb, 비육돈사는 381.75 ppb로 두 돈사가 유사한 농도를 나타냈다. 이들 돈사에서 배출되는 프로피온산은 부지경계선에서 31.22 ppb로 11.4~12.2배 감소하는 경향을 보였고, 배출허용기준인 30 ppb보다 다소 높은 것으로 확인되었다.

B 농장에서 프로피온산 농도는 육성돈사 245.10 ppb, 비육돈사 335.21 ppb, 부지경계선 54.04 ppb를 나타내었다. 이들 돈사 내부에서 부지경계선으로 배출된 프로피온산 농도는 감소하는 경향을 보였지만, 배출허용기준치보다 1.8배 초과하는 것으로 조사되었다. 그리고 C 농장에서 프로피온산은 육성돈사와 비육돈사에서 각각 199.10, 302.60 ppb로 B 농장과 유사한 농도를 보였고, 부지경계선에서는 54.20 ppb를 나타냈다.

D 농장의 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 프로피온산 농도는 각각 841.31, 420.12, 57.11 ppb로 측정 양돈시설 중 가장 높은 농도를 보였다. 그리고 부지경계선에서 육성돈사, 비육돈사에서 배출된 프로피온산이 14.7, 7.4배 감소하는 특징을 보였다.

위 결과에서 프로피온산 성분은 측정한 양돈시설들의 부지경계선에서 악취공정시험법 배출허용기준치 30 ppb를 모두 초과하는 것으로 확인되었고, 이는 프로피온산이 양돈장에서 배출되는 주요 악취 물질인 것으로 추정된다.

Table 30. Concentrations of propionic acid for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	31.22±15.41	355.26±80.28	381.75±45.02	11.4	12.2
B	54.04±28.42	245.10±71.51	335.21±88.13	4.5	6.2
C	54.20±29.38	199.10±64.53	302.60±93.63	3.7	5.6
D	57.11±15.78	841.31±248.25	420.12±186.58	14.7	7.4

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

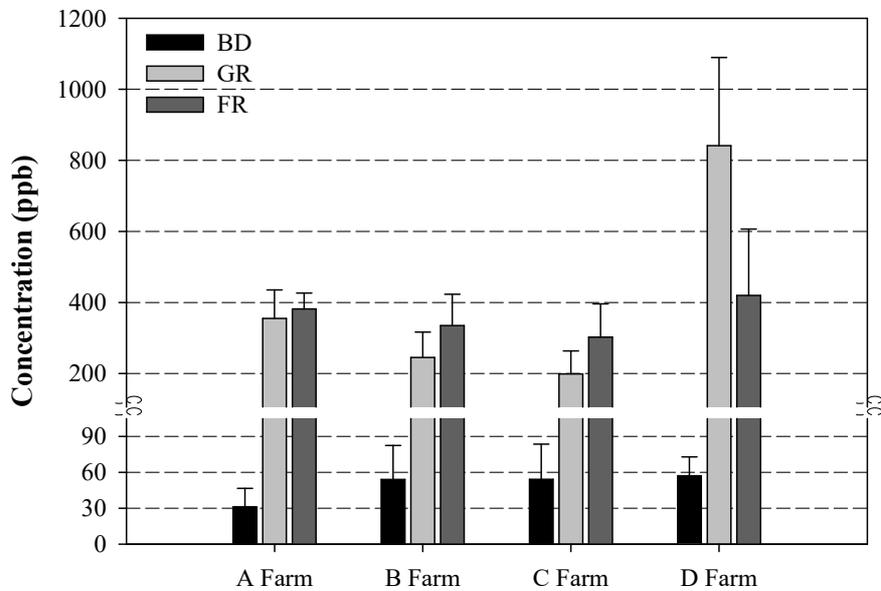


Figure 26. Comparison of propionic acid concentrations for four swine farms.

2.5.2 뷰티르산 농도

4개 양돈장에서 2018년 11월부터 12월까지 3회에 걸쳐 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 뷰티르산(Butyric acid, BA) 시료를 채취하였고, 분석 결과를 Table 31과 Figure 27에 나타내었다. 육성돈사에서 뷰티르산 농도는 130.51~664.80 ppb이었고, 비육돈사는 196.97~297.56 ppb의 수준을 보였다. 그리고 부지경계선에서는 뷰티르산이 19.64~39.29 ppb로 약취공정법 배출허용기준치인 1.0 ppb보다 19.6~39.3배 크게 초과하는 것으로 조사되었다.

각 농장별로 구분하여 뷰티르산의 농도를 비교한 결과, A 농장의 뷰티르산 농도는 육성돈사, 비육돈사에서 302.26, 266.21 ppb로 육성돈사와 비육돈사가 비슷한 농도를 보였다. 그리고 이들 돈사에서 배출되는 뷰티르산은 부지경계선에서 32.64 ppb로 8.2~9.3배 낮은 경향을 보였지만, 배출허용기준치를 32.6배 초과하는 것으로 나타났다. B 농장은 육성돈사와 비육돈사에서 각각 162.23, 196.97 ppb의 농도를 보였고, 부지경계선에서는 39.29 ppb로 육성돈사와 비육돈사에 비해 각각 4.1, 5.0배 농도가 낮은 패턴을 나타내었다.

C 농장은 뷰티르산 농도가 육성돈사에서 130.51 ppb를 나타내었고, 비육돈사는 199.24 ppb로 육성돈사에 비해 다소 높은 농도를 보였다. 그리고 부지경계선에서는 19.64 ppb의 농도로 배출허용기준치를 6.6~10.1배 초과하는 것으로 조사되었다. D 농장은 뷰티르산이 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 각각 664.80, 297.56, 32.99 ppb의 농도를 보였고, 이때 D 농장의 부지경계선에서 농도수준은 약취공정시험법 배출허용기준치를 초과하는 것으로 확인되었다.

위의 결과들로부터 측정한 양돈시설의 부지경계선에서 뷰티르산 농도는 모든 농장에서 약취공정시험법 배출허용기준치 1.0 ppb를 크게 초과하는 것으로 조사되었다. 뷰티르산 성분은 양돈장에서 배출되는 주요 악취물질인 것으로 판단되며 악취 관리에 필요한 물질인 것으로 사료된다.

Table 31. Concentrations of butyric acid for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	32.64±18.85	302.26±27.01	266.21±36.49	9.3	8.2
B	39.29±23.83	162.23±62.25	196.97±2.71	4.1	5.0
C	19.64±17.27	130.51±53.83	199.24±102.77	6.6	10.1
D	32.99±5.64	664.80±168.70	297.56±186.28	20.2	9.0

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

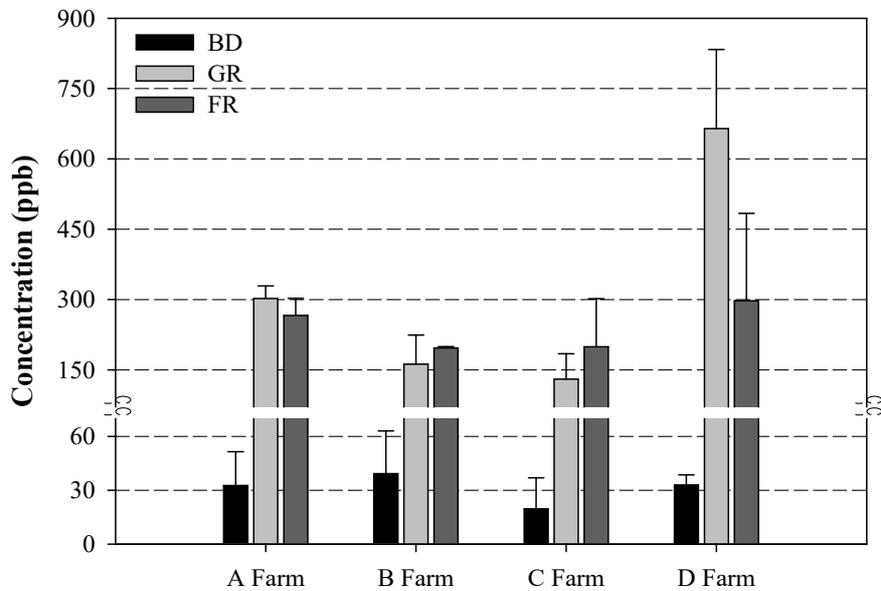


Figure 27. Comparison of butyric acid concentrations for four swine farms.

2.5.3 *iso*-발레르산 농도

iso-발레르산(*iso*-Valeric acid, *iso*-VA)은 양돈장 내·외부에서 시료를 채취하였고, 그 결과를 Table 32과 Figure 28에 나타내었다. *iso*-발레르산 농도는 육성돈사에서 19.82~85.04 ppb, 비육돈사는 24.78~48.29 ppb의 범위로 D 농장의 육성돈사와 비육돈사가 농도가 높았다. 그리고 부지경계선은 *iso*-발레르산 농도가 5.55~11.76 ppb로 모든 농장에서 악취공정법 배출허용기준치인 1.0 ppb를 초과하는 것으로 조사되었다.

iso-발레르산의 농도를 각 농장별로 비교한 결과, A 농장에서 *iso*-발레르산의 농도는 육성돈사 41.25 ppb, 비육돈사 46.57 ppb로 비슷한 농도 수준을 보였다. 그리고 이들 돈사로부터 배출되는 *iso*-발레르산 농도는 부지경계선에서 6.86 ppb로 돈사 내부에서 6.0~6.8배 감소하는 경향을 보였다. B 농장은 *iso*-발레르산 농도가 육성돈사 25.93 ppb, 비육돈사 29.90 ppb를 보였고, 부지경계선에서는 11.76 ppb로 악취공정법 배출허용기준치를 초과하는 것으로 나타났다. C 농장에서는 *iso*-발레르산이 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 각각 19.82, 24.78, 8.44 ppb의 농도를 보였고, 이때 두 돈사에서 배출되는 *iso*-발레르산 성분이 부지경계선에서 농도감소가 다른 화합물들에 비해 감소되는 패턴이 낮은 것으로 확인되었다. 이를 통하여 *iso*-발레르산 성분은 대기 중에서 분해가 잘 일어나지 않는 것으로 추정된다.

D 농장은 *iso*-발레르산 성분이 육성돈사 85.04 ppb, 비육돈사 48.29 ppb의 농도로 다른 농장에 비해 부지경계선에서 *iso*-발레르산은 5.55 ppb로 배출허용기준치보다 5.6배 높은 것으로 조사되었다.

위의 결과로부터 측정된 4개 양돈장에서 *iso*-발레르산의 농도는 악취공정시행법 배출허용기준에 비해 크게 초과하는 것으로 나타났고, 이에 양돈장에서 배출되는 주요 악취물질로 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Table 32. Concentrations of *iso*-valeric acid for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	6.86±5.71	41.25±8.70	46.57±11.10	6.0	6.8
B	11.76±6.95	25.93±13.28	29.90±7.21	2.2	2.5
C	8.44±5.60	19.82±1.33	24.78±2.72	2.3	2.9
D	5.55±3.45	85.04±26.40	48.29±19.15	15.3	8.7

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

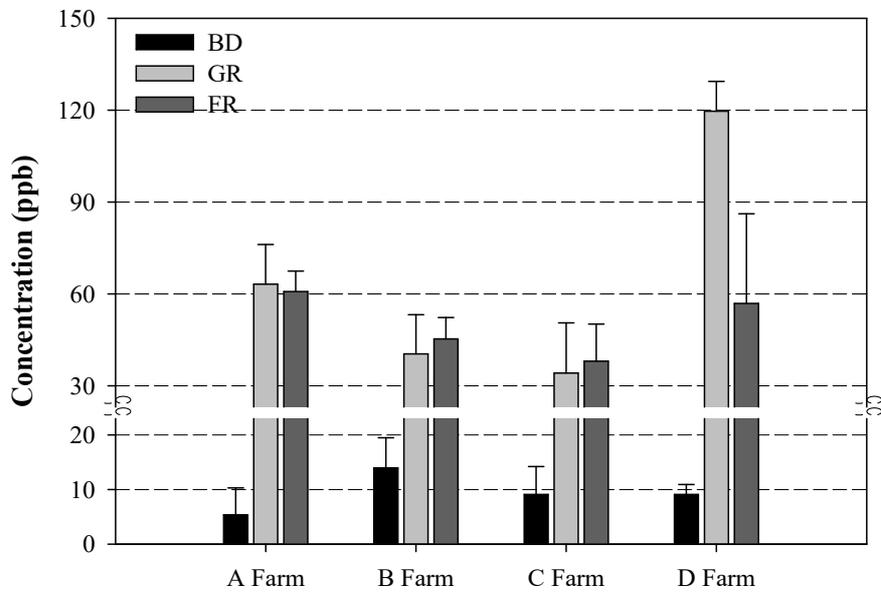


Figure 28. Comparison of *iso*-valeric acid concentrations for four swine farms.

2.5.4 *n*-발레르산 농도

제주지역 4개 양돈장에서 *n*-발레르산(*n*-Valeric acid, *n*-VA) 시료를 채취하였고, 그 분석결과를 Table 33과 Figure 29에서 상호 비교하였다. 육성돈사에서 *n*-발레르산의 농도는 34.17~119.66 ppb, 비육돈사 38.07~60.78 ppb 부지경계선은 5.37~13.95 ppb의 범위로 나타났다. 이들 돈사에서 배출되는 *n*-발레르산은 부지경계선에서 2.9~13.2배 감소하는 특징을 보였고, 배출허용기준치 0.9 ppb를 모두 초과하는 것으로 나타났다.

n-발레르산 성분을 각 농장별로 구분하여 비교한 결과, A 농장은 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선이 각각 63.21, 60.78, 5.37 ppb으로 돈사 내부는 서로 유사한 농도를 보였고, 부지경계선은 배출허용기준치(0.9 ppb)를 6.0배 초과하였다. B 농장에서는 *n*-발레르산 농도가 육성돈사와 비육돈사에서 각각 40.42, 45.31 ppb를 나타내었고, 이때 돈사 내부로부터 배출된 *n*-발레르산 농도는 부지경계선에서 13.95 ppb로 2.9~3.2배 감소하는 것으로 조사되었다.

C 농장에서 *n*-발레르산 농도는 육성돈사와 비육돈사에서 각각 40.42, 45.31 ppb를 보였고, 부지경계선에서는 9.11 ppb로 배출허용기준치보다 10.1배 높은 것으로 나타났다. D 농장은 *n*-발레르산 성분이 육성돈사와 비육돈사, 그리고 부지경계선에서 각각 119.66, 56.89, 9.09 ppb로 다른 양돈장에 비해 농도를 보였다.

위 결과들로부터 4개 양돈장에서 *n*-발레르산 성분은 휘발성 저급지방산 프로피온산, 뷰티르산, *iso*-발레르산 성분들은 유사한 농도 경향을 보였고, 이를 통해 휘발성 저급지방산 성분들의 발생원이 동일한 것으로 추정된다. 그리고 모든 농장의 부지경계선에서 악취공정시험법 배출허용기준(0.9 ppb)을 6.0~15.5배 초과하였다. 따라서 양돈장에서 배출되는 악취를 효과적으로 관리하기 위해서는 휘발성 저급지방산에 대한 관리가 우선되어야 할 것으로 판단된다.

Table 33. Concentrations of *n*-valeric acid for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	5.37±4.91	63.21±12.92	60.78±6.69	11.8	11.3
B	13.95±5.52	40.42±12.79	45.31±6.98	2.9	3.2
C	9.11±5.11	34.17±16.36	38.07±12.08	3.8	4.2
D	9.09±1.82	119.66±9.71	56.89±29.26	13.2	6.3

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

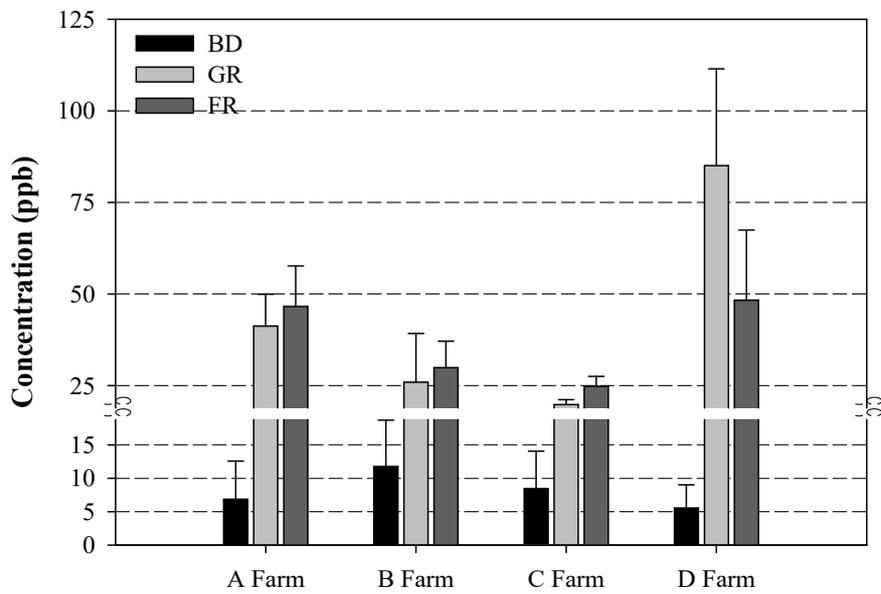


Figure 29. Comparison of *n*-valeric acid concentrations for four swine farms.

2.7 페놀 및 인돌류

Phenole, *p*-cresol, indole, skatole 성분들은 양돈장에서 발생하는 주요 악취 물질로 국내·외 선행연구를 통해 알려져있다(O'Neill and Phillips, 1992; William and Evans, 1981).

Phenole과 *p*-cresol 성분은 가축 장내에서 L-tyrosine과 phenylalanine의 미생물 분해로부터 생성되며, 이 중 90%는 *p*-cresol로 생성된다(국립환경과학원, 2017; Ishaque *et al.*, 1985). L-tryptophan의 대사는 Propionbacterium, Escherichia, Eubacteria 등의 박테리아에 의해 skatole과 indole로 변환될 수 있는 indole acetate를 생성할 수 있게 된다(Mackie, 1994). 이들 화합물들은 가축의 대장 점막을 통해 간으로 이동하여 glucuronide, 황산 및 무기태황으로 변환된다(Smith and Williams, 1966). 그리고 이들 물질들은 뇨를 통하여 배설되며, 분과 뇨가 혼합되면 분의 β -glucuronidase에 의해 glucuronide가 분해되어 페놀류와 인돌류가 다시 생성된다. 악취물질은 뇨보다 분에 더 많이 분포되어 있으며, 뇨에는 악취강도가 높은 *p*-cresol이 많이 함유되어 있어 악취강도는 뇨에서 더 높게 나타난다(조성백 등, 2014). phenole, *p*-cresol, indole, skatole의 최소감지농도는 각각 0.28, 0.054, 0.30, 0.0056 ppb로 따라서 페놀과 인돌 화합물들은 저농도에서 후각에 인지되어 불쾌감을 유발하는 물질로 사람이 인지적으로 냄새를 인식할 수 있는 악취를 발생시킨다(이은영 등, 2010).

p-cresol에 노출될 시에는 인체에 미치는 영향으로 눈, 피부, 목, 입의 자극과 화상을 유발하며, 그리고 복통, 구토, 간, 심장 일으키는 것으로 보고되고 있다. 또한 미국 산업안전보건청에서는 *p*-cresol 물질을 TWA 5 ppm (22 mg/m³)를 기준으로 노출을 제한하고 있다.

Skatole 성분은 축산업에서 소, 양, 염소 등과 같은 반추동물들에서 AFPE(급성 폐부종 및 폐기종) 만성 질환의 원인이 된다(정재연, 2012). 그러나 돼지는 skatole에 대한 독성이 보고되지 않았지만, 생산적인 측면에서 냄새를 유발할 수 있어 양돈산업에 영향을 초래한다(정일병, 1994).

이처럼 페놀과 인돌 화합물들은 국내에서 환경부 악취방지법에서 지정한 22종의 지정악취물질로 포함되어 있지 않지만 저농도에서 악취를 유발하여 신체적

건강에 악영향을 미친다. 따라서 이들 물질에 대하여 관리하기 위해서는 정량적 분석방법과 배출량 산정이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 악취물질인 phenole, *p*-cresol, indole, skatole의 배출량을 파악하기 위하여 2018년 11월부터 12월까지 시료를 채취하였고, 분석 결과를 Figure 30~33과 Table 34~37에 나타내었다.

2.7.1 페놀 농도

비지정악취물질인 페놀(Phenol, PHE) 성분을 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 시료를 채취하여 분석하였고, 그 결과를 Figure 30과 Table 34에서 상호 비교하였다. 페놀은 육성돈사, 비육돈사에서 각각 2.94~16.21 ppb, 3.06~17.13 ppb의 농도를 보였고, 부지경계선에서 페놀 농도는 0.22~0.32 ppb로 최소감지농도 0.28 ppb와 유사한 수준을 보이는 것으로 조사되었다.

페놀 성분을 농장별로 구분하여 비교해 본 결과, A 농장은 페놀이 육성돈사 16.21 ppb, 비육돈사 7.04 ppb의 농도로 육성돈사에서 다소 높은 것으로 나타났다. 이들 돈사내부에서 발생한 페놀은 부지경계선에서 0.31 ppb로 페놀의 최소감지농도보다 1.1배 높았다. B 농장에서 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선의 페놀 농도는 각각 2.94, 3.06, 0.29 ppb를 보였고, 육성돈사와 비육돈사의 페놀 농도가 비슷한 수준으로 확인되었다. 그리고 부지경계선에서는 A 농장과 유사하게 최소감지농도 수준으로 조사되었다.

C 농장에서 페놀 성분이 육성돈사와 비육돈사가 각각 6.32, 8.25 ppb를 보였고, 이들 돈사 내부에서 배출된 페놀은 부지경계선에서 0.22 ppb로 측정 농장 중에서 농도가 가장 낮았고, 최소감지농도보다도 낮은 것으로 조사되었다. D 농장의 육성돈사와 비육돈에서 페놀은 각각 14.75, 17.13 ppb의 농도를 나타내었고, 부지경계선에서는 페놀 농도가 0.32 ppb로 다른 농장과 유사한 경향을 보였다.

페놀은 비지정악취물질로 환경부 악취공정법에 배출허용기준이 따로 마련되지 않고 있다. 각 양돈장에서 발생한 페놀 농도를 최소감지농도와 비교한 결과, 페놀은 돈사 내부에서 최소감지농도보다 10.5~61.2배 높은 것으로 나타나 돈사 내부에서 악취를 유발하는 것으로 추정되었다. 그러나 부지경계선에서는 페놀 농도수준이 최소감지농도 0.28 ppb와 비슷한 수준으로 나타나 외부에서 악취를 유발하지 않는 것으로 조사되었다.

Table 34. Concentrations of phenol for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.31±0.40	16.21±15.34	7.04±4.58	51.5	22.4
B	0.29±0.37	2.94±2.82	3.06±1.31	10.0	10.4
C	0.22±0.27	6.32±4.57	8.25±4.04	29.2	38.1
D	0.32±0.41	14.75±9.92	17.13±15.42	46.4	53.8

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

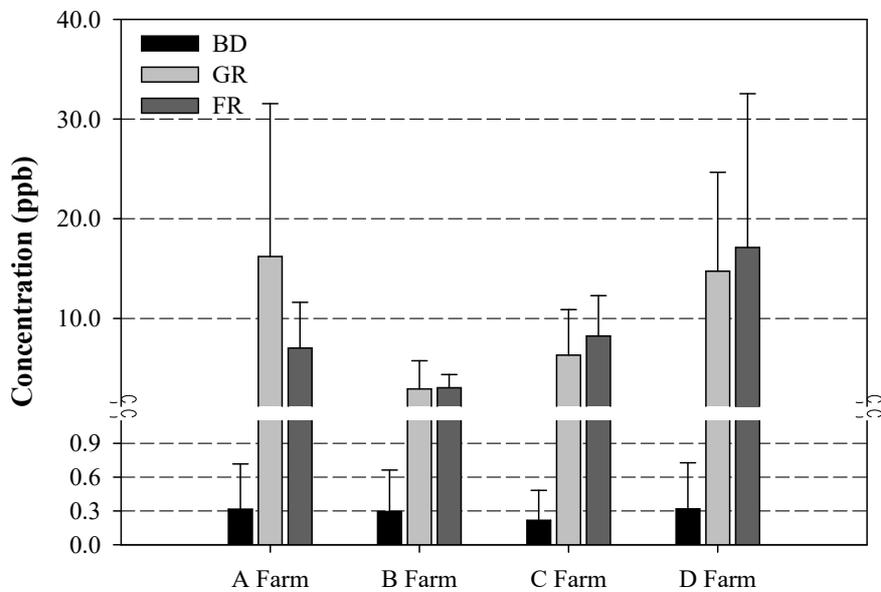


Figure 30. Comparison of phenol concentrations for four swine farms.

2.7.2 *p*-크레졸 농도

제주지역 양돈장에서 *p*-크레졸(*p*-Cresol, *p*-C) 성분의 발생량을 확인하기 위해서 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선으로 구분하여 시료를 채취하여 분석하였고, 그 결과를 Figure 31와 Table 35에 나타내었다. *p*-크레졸은 육성돈사에서 12.11~66.46 ppb의 농도 범위를 보였고, 비육돈사는 10.17~76.50 ppb으로 육성돈사와 비육돈사가 비슷한 농도수준을 나타내었다. 부지경계선에서 *p*-크레졸은 0.18~0.34 ppb로 *p*-크레졸 최소감지농도인 0.054 ppb보다 높은 것으로 나타났다.

p-크레졸 성분을 농장별로 구분하여 상호 비교한 결과, A 농장에서 *p*-크레졸 농도는 육성돈사와 비육돈사에서 각각 42.11, 33.70 ppb로 이들 돈사로부터 발생한 *p*-크레졸 성분은 부지경계선에서 0.25 ppb로 확인되었다. B 농장은 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선이 각각 12.11, 10.17, 0.18 ppb로 4개 양돈시설 중 가장 낮은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다.

C 농장의 육성돈사와 비육돈사에서 *p*-크레졸 농도는 각각 23.00, 29.08 ppb를 보였고, 부지경계선에서는 0.24 ppb로 A 농장과 유사한 농도 경향을 보이는 것으로 확인되었다. D 농장에서 *p*-크레졸 농도는 육성돈사에서 66.46 ppb이었고, 비육돈사는 76.50 ppb로 D 농장이 다른 농장에 비해 농도가 가장 높은 것으로 나타났다.

위와 같은 결과로부터 4개 양돈장의 육성돈사와 비육돈사에서 *p*-크레졸은 높은 농도를 나타내어 주요 악취 원인물질인 것으로 판단된다. 부지경계선에서는 최소감지농도보다 3.3~6.3배 높은 수준으로 악취 민원 원인물질로 판단하는 것에는 어려움이 있다. 따라서 *p*-크레졸은 부지경계선에서 악취에 미치는 영향은 적었지만, 돈사 내부에서 높은 농도로 존재하기 때문에 지속적인 관리가 필요한 물질인 것으로 판단된다.

Table 35. Concentrations of *p*-cresol for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.25±0.07	42.11±33.99	33.70±12.09	169.4	135.6
B	0.18±0.03	12.11±11.24	10.17±2.84	67.1	56.3
C	0.24±0.06	23.00±23.40	29.08±28.54	95.7	121.0
D	0.34±0.09	66.46±53.75	76.50±63.53	196.1	225.7

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

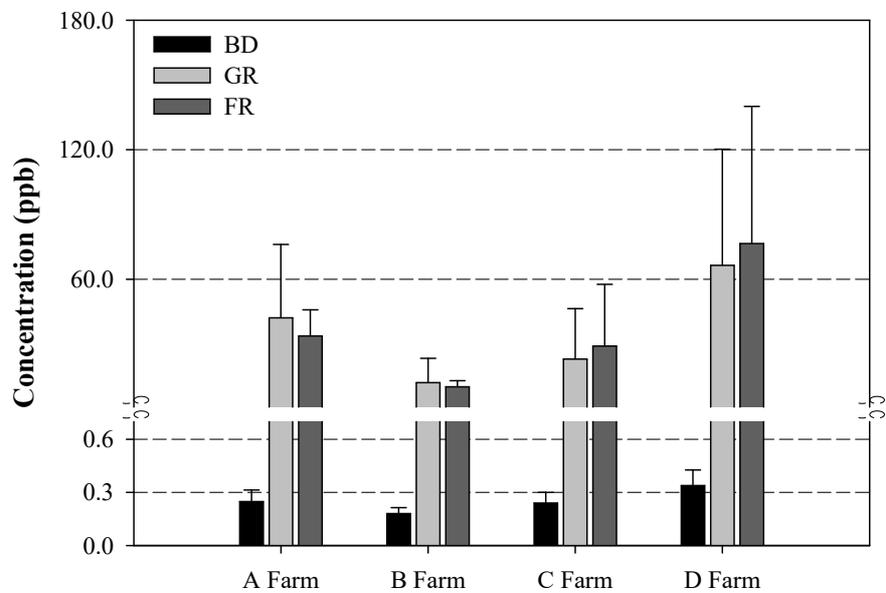


Figure 31. Comparison of *p*-cresol concentrations for four swine farms.

2.7.3 인돌 농도

사육규모가 유사한 4개의 양돈장에서 돈사 내·외부를 구분하여 비지정악취물질인 인돌(Indole, IND)성분을 채취하였고, 그 결과를 Figure 32과 Table 36에 나타내었다. 양돈시설 내부인 육성돈사와 비육돈사에서 인돌 농도는 각각 0.53~2.91 ppb, 0.50~2.24 ppb를 보였고, 양돈시설 외부인 부지경계선은 0.07~0.10 ppb로 모든 농장 인돌 최소감지농도 0.3 ppb보다 낮은 것으로 나타났다.

인돌 농도를 농장별로 구분하여 상호 비교한 결과에서 A 농장은 육성돈사에서 1.55 ppb, 비육돈사는 1.34 ppb의 농도를 보였고, 이들 돈사로부터 배출된 인돌은 부지경계선에서 0.08 ppb로 조사되었다. B 농장의 인돌 성분은 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 각각 0.53, 0.50, 0.07 ppb로 육성돈사와 비육돈사의 농도가 유사한 수준을 보였고, 부지경계선에서 인돌 농도가 6.6~7.1배 감소하는 경향을 나타내었다.

C 농장에서 인돌성분은 육성돈사와 비육돈사에서 각각 1.35, 0.79 ppb를 보였고, 부지경계선에서 0.08 ppb로 나타났다. 그리고 D 농장은 인돌 농도가 육성돈사 2.91 ppb, 비육돈사 2.24 ppb로 측정된 다른 농장들에 비해 농도가 높았고, 부지경계선 또한 다른 농장들과 비교하여 높은 농도를 나타내었다.

위의 결과를 종합해보면, 인돌 성분은 4개 양돈시설의 돈사 내부에서 농도 수준은 최소감지농도 0.3 ppb에 비해 높은 농도를 보였으나, 부지경계선에서는 모든 농장이 최소감지농도보다 낮은 것으로 조사되었다. 따라서 인돌 성분은 양돈시설에서 발생하는 악취물질이 아닌 것으로 추정된다.

Table 36. Concentrations of indole for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.08±0.13	1.55±1.41	1.34±1.44	18.7	16.2
B	0.07±0.11	0.53±0.40	0.50±0.22	7.1	6.6
C	0.08±0.12	1.35±1.08	0.79±0.43	16.0	9.4
D	0.10±0.12	2.91±2.12	2.24±1.77	30.6	23.6

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

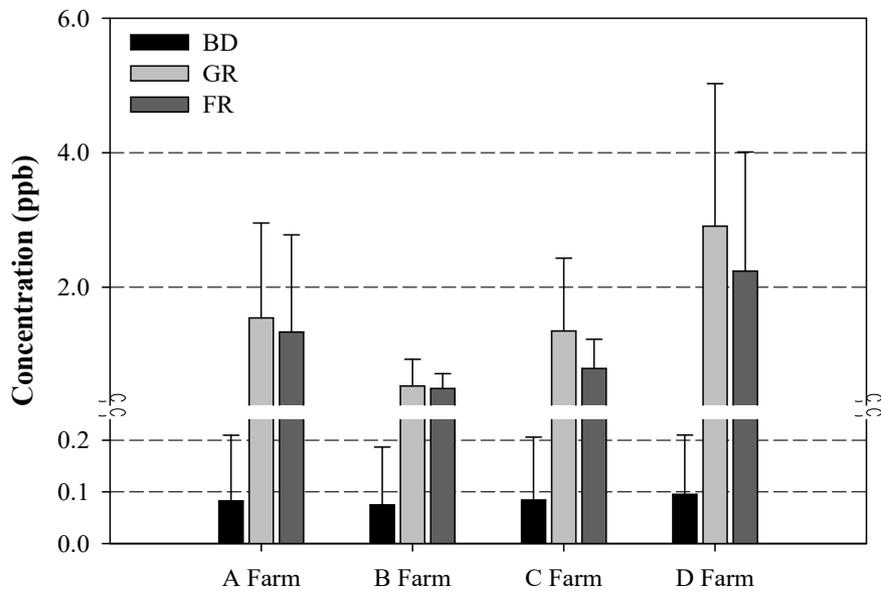


Figure 32. Comparison of indole concentrations for four swine farms.

2.7.4 스카톨 농도

스카톨(Skatole, SKT) 성분은 인돌에 메틸기가 하나 붙은 유도체 성분으로 주로 방귀냄새와 유사한 특징을 가진다. 양돈장에서 주요 발생 물질로 알려져 있는 스카톨 성분을 양돈장의 육성돈사, 비육돈사, 부지경계선에서 시료를 채취하였으며, 분석 결과를 Figure 33와 Table 37에서 나타내었다. 4개 양돈장에서 스카톨 성분은 육성돈사 0.89~5.86 ppb, 비육돈사 0.25~4.39 ppb 부지경계선 0.01~0.05 ppb의 농도범위를 보였다. 그리고 부지경계선의 농도수준은 스카톨 최소감지농도는 0.0056 ppb보다 2.2~9.7배 초과하였다.

스카톨 성분을 각 농장별로 농도를 비교한 결과, A 농장은 스카톨이 육성돈사 5.86 ppb, 비육돈사 5.78 ppb로 두 돈사가 유사한 농도를 보였고, 부지경계선에서는 0.02 ppb로 나타났다. B 농장은 육성돈사, 비육돈사에서 각각 2.78 2.89 ppb로 나타났고, B농장 또한 두 돈사 내부농도가 유사한 것으로 확인되었다. 그리고 이들 돈사에서 발생한 스카톨 성분은 부지경계선에서 0.01 ppb로 최소감지농도보다 2.2배 높은 농도를 보였다.

C 농장의 육성돈사에서 스카톨 농도가 0.89 ppb로 비육돈사 0.25 ppb에 비해 높은 농도를 나타내었고, 부지경계선에서는 0.05 ppb로 최소감지농도에 비해 9.7배 높은 것으로 보아 악취 민원에 영향을 미칠 것으로 판단된다. D 농장은 육성돈사와 비육돈사의 스카톨 농도가 각각 5.71, 4.39 ppb로 다른 농장들에 비해 높은 농도를 나타내었고, 부지경계선에서는 0.02 ppb로 돈사 내부에서 배출된 스카톨 농도가 190.7~247.9배 감소하는 것으로 조사되었다.

위 결과로부터 스카톨 성분은 육성돈사와 비육돈사에서 0.25~5.86 ppb로 최소감지농도(0.0056 ppb)보다 크게 초과하는 것으로 확인되었다. 그리고 부지경계선에서도 최소감지농도를 초과하였고, 이는 스카톨 성분이 양돈장에서 발생하는 주요 악취 물질이 될 수 있을 것으로 사료된다.

Table 37. Concentrations of skatole for four swine farms.

Farm	Concentration (ppb)			Ratio	
	BD	GR	FR	GR/BD	FR/BD
A	0.02±0.02	5.86±4.02	5.78±3.52	248.4	245.3
B	0.01±0.01	2.78±2.26	2.89±1.67	223.2	232.2
C	0.05±0.03	0.89±0.76	0.25±0.18	16.4	4.7
D	0.02±0.01	5.71±3.44	4.39±2.97	247.9	190.7

*BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

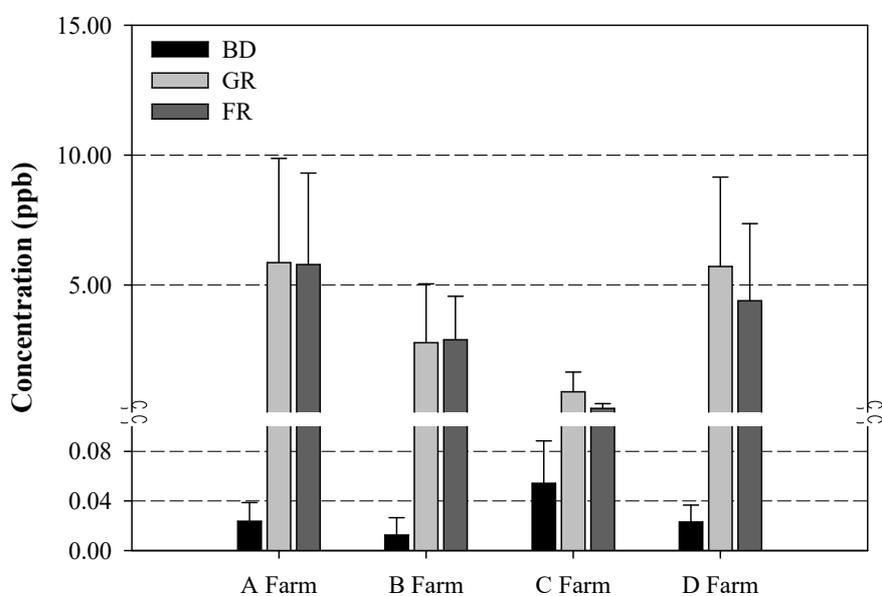


Figure 33. Comparison of skatole concentrations for four swine farms.

3. 악취 원인물질 기여도

악취물질은 각 성분별로 최소 감지농도가 다르기 때문에 개별 악취물질의 농도만을 기준으로 악취강도를 파악하기에 어려움이 있다(송정민, 2014). 따라서 기기분석에 의해서 검출된 개별 악취물질의 농도를 각 물질의 최소감지농도로 나누어 준 값인 악취지수 (Odor Quotient, OQ)와 총악취지수 (Sum of Odor Quotient, SOQ)를 이용하여 악취기여도를 평가함으로써 주요 악취 원인물질 파악이 가능하다. 이 때 OQ가 10 이상이면 약한 취기를 느끼고 100 이상이면 취기를 감지하는 수준을 나타낸다. 따라서 OQ 값이 100 이상이면 이들 성분들은 주요 악취원인물질로 작용하고 있다고 평가할 수 있다. 또한 악취기여도는 다음의 계산식 (1), (2)에 의해 산출할 수 있다. 그리고 악취물질의 전체 세기를 평가하기 위한 방법으로 총악취지수를 적용할 수 있으며, 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다. 본 연구에서는 각 돈사 방식별로 주요 악취 원인물질의 기여도를 이와 같은 방법으로 구하여 평가하였다. 이 때 악취 최소감지농도는 환경부에서 제시한 기준을 적용하였다(환경부, 2007).

$$\text{odor Quotient} = \frac{\text{Odor concentration (ppbv)}}{\text{Thresholdvalue (ppbv)}} \quad (1)$$

$$\text{Contribution of Odor (CO)} = \frac{OQ}{\Sigma OQ} \times 100 \quad (2)$$

$$\Sigma \text{ of Odor Quotient (SOQ)} = \Sigma \text{ Odor Quotient (OQ)} \quad (3)$$

본 연구에서는 4개 양돈시설에서 측정된 개별 악취 농도를 기초로 각 돈사별 악취지수 (OQ)와 총악취지수 (SOQ)를 구하였고, 그에 따른 악취기여도를 함께 산출하여 결과를 Table 38~49 Figure 34~35에서 나타내었다. 각 농장별로 돈사 내부의 총악취지수 (SOQ)는 육성돈사에서 A 농장 (18612) > D 농장 (16154) > B 농장 (5243) > C 농장(4235), 비육돈사는 A 농장 (21299) > B 농장 (11260) > D 농장 (8977) > C 농장(4334)로 모든 돈사 내부의 총악취지수 중에서 A 농장 비육돈사가 가장 높은 것으로 조사되었다. 또한 부지경계선의 총악

취지수는 B 농장 (770) > D 농장 (558) > C 농장 (491) > A 농장 (459)로 B 농장이 다른 농장에 비해 악취가 다소 많이 배출되는 것으로 사료된다.

각 농장별로 악취지수를 비교한 결과, A 농장의 악취지수는 육성돈사는 H₂S > CH₃SH > *n*-VA > BA > SKT > *p*-C > *iso*-VA > TMA > PA > NH₃ > PHE > ACHO > *iso*-VCHO > DMS > BCHO > IND > PCHO > *n*-VCHO > *iso*-BuAl > MEK > BuAc > STR > MIBK > XYL > TOL > DMDS 순이고, 비육돈사는 H₂S > *n*-VA > BA > TMA > SKT > CH₃SH > *p*-C > *iso*-VA > NH₃ > PA > ACHO > *iso*-VCHO > PHE > DMS > PCHO > IND > BCHO > *n*-VCHO > *iso*-BuAl > MEK > BuAc > STR > TOL > MIBK > XYL > DMDS의 순서를 나타내었고, 이들 돈사 내부에서는 황 화합물인 황화수소(H₂S)가 높은 악취지수를 보이는 것으로 조사되었다. 부지경계선은 BA > *n*-VA > *iso*-VA > H₂S > TMA > PA > *p*-C > SKT > ACHO > NH₃ > PHE > BCHO > PCHO > IND > DMS > BuAc > STR > MEK > XYL > MIBK > TOL > CH₃SH > DMDS > *iso*-VCHO > *n*-VCHO > *iso*-BuAl 순으로, 이 중 BA의 악취지수가 가장 높았다(Table 38).

A 농장의 악취기여도는 육성돈사와 비육돈사에서 모두 황 화합물이 65.2, 68.0%로 가장 높았고, 다음으로 휘발성 저급지방산이 17.4~20.9%로 확인되었다. 그러나 부지경계선에서는 휘발성 저급지방산의 기여도는 89.3%를 차지하였고, 이를 통해 A 농장에서 돈사 외부로 배출되는 악취물질을 관리하기 위해서는 휘발성 저급지방산을 중점으로 관리가 이루어져야 될 것으로 판단된다(Table 39).

B 농장의 악취지수는 육성돈사에서 H₂S > *n*-VA > BA > SKT > TMA > *iso*-VA > *p*-C > NH₃ > CH₃SH > ACHO > PA > *iso*-VCHO > PHE > PCHO > BCHO > DMS > IND > *n*-VCHO > *iso*-BuAl > BuAc > MEK > STR > XYL > MIBK > TOL > DMDS, 비육돈사는 H₂S > *n*-VA > BA > SKT > TMA > *iso*-VA > CH₃SH > *p*-C > NH₃ > PA > ACHO > *iso*-VCHO > PHE > PCHO > BCHO > DMS > *n*-VCHO > IND > *iso*-BuAl > BuAc > MEK > STR > XYL > MIBK > TOL > DMDS, 부지경계선에서는 *n*-VA > BA > *iso*-VA > PA > TMA > H₂S > *p*-C > ACHO > SKT > NH₃ > PHE > BCHO > PCHO > DMS > IND > BuAc >

iso-BuAl > STR > MEK > XYL > MIBK > TOL > CH₃SH > DMDS > iso-VCHO > n-VCHO의 순서로 확인되었다(Table 40). 육성돈사, 비육돈사에서 모두 H₂S 성분이 높은 악취지수를 보였고, 부지경계선에서는 n-VA, BA, iso-VA 성분들이 악취지수가 높은 것으로 조사되었다.

그리고 B 농장의 악취기여도는 육성돈사에서 휘발성 저급지방산이 44.3%로 기여도가 높았고, 비육돈사는 황 화합물이 63.6%로 육성돈사와 비육돈사의 악취기여도가 다른 경향을 보였다. 또한 부지경계선에서는 휘발성 저급지방산이 96.6%로 대부분을 차지하는 것으로 보아 휘발성 저급지방산 물질들에 대한 관리가 필요할 것으로 사료된다(Table 41).

C 농장은 육성돈사에서 악취지수가 n-VA > TMA > BA > p-C > H₂S > CH₃SH > iso-VA > SKT > NH₃ > ACHO > PA > PHE > iso-VCHO > IND > PCHO > BCHO > DMS > n-VCHO > iso-BuAl > BuAc > MEK > STR > MIBK > XYL > TOL > DMDS, 비육돈사는 BA > n-VA > TMA > p-C > H₂S > iso-VA > CH₃SH > NH₃ > PA > SKT > ACHO > PHE > iso-VCHO > PCHO > IND > BCHO > DMS > n-VCHO > iso-BuAl > BuAc > STR > MEK > XYL > TOL > MIBK > DMDS, 부지경계선은 n-VA > iso-VA > BA > SKT > PA > p-C > H₂S > ACHO > NH₃ > PHE > BCHO > TMA > PCHO > IND > DMS > BuAc > STR > MEK > XYL > TOL > MIBK > CH₃SH > DMDS > iso-VCHO > n-VCHO > iso-BuAl 순으로 돈사 내부는 육성돈사가 n-VA성분이 비육돈사에서는 BA성분이 가장 높은 악취지수를 보였다. 그리고 부지경계선에서는 n-VA, iso-VA, BA 성분들이 악취지수가 높았다(Table 42).

또한 C 농장에서 돈사 내부의 악취기여도는 휘발성 저급지방산이 44.9~56.5%로 가장 높은 수준을 보였고, 부지경계선은 휘발성 저급지방산이 95.2%로 다른 농장과 유사한 경향을 보였다. 이를 통해 C 농장 또한 휘발성 저급지방산의 영향을 가장 많이 받는 것으로 조사되었다(Table 43).

D 농장에서 육성돈사는 H₂S > BA > n-VA > p-C > iso-VA > SKT > TMA > CH₃SH > NH₃ > PA > ACHO > PHE > IND > iso-VCHO > PCHO > BCHO > n-VCHO > DMS > iso-BuAl > BuAc > STR > MEK >

XYL > TOL > MIBK > DMDS 순이고, 비육돈사는 BA > *n*-VA > *p*-C > TMA > H₂S > SKT > *iso*-VA > CH₃SH > NH₃ > PA > PHE > ACHO > IND > *iso*-VCHO > PCHO > BCHO > DMS > *n*-VCHO > *iso*-BuAl > MEK > BuAc > STR > TOL > XYL > MIBK > DMDS, 부지경계선에서는 *n*-VA > BA > *iso*-VA > NH₃ > H₂S > TMA > PA > *p*-C > SKT > ACHO > PHE > BCHO > PCHO > IND > DMS > BuAc > STR > MEK > XYL > MIBK > TOL > CH₃SH > DMDS > *iso*-VCHO > *n*-VCHO > *iso*-BuAl 순서로 나타났다(Table 44). D 농장에서 육성돈사는 H₂S 성분이 가장 높은 악취지수를 보였고, 비육돈사는 BA 성분이 가장 높았다. 이처럼 육성돈사와 비육돈사가 서로 다른 경향이 나타났고, 그 이유는 시료 채취 당시에 비육돈사에서 돼지 출하로 인한 사육두수 차이로 사료된다. 부지경계선에서는 *n*-VA, BA, *iso*-VA 순으로 휘발성 저급지방산들이 대부분 높은 악취지수를 보였고, 그 다음으로 NH₃ 성분이 악취지수가 높은 것으로 조사되었다.

D 농장의 악취기여도는 돈사 내부에서 휘발성 저급지방산이 42.3~49.3%, 황 화합물이 17.0~29.83%, 질소화합물이 5.9~14.6%, 페놀류 7.9~16.5%, 인돌류 6.4~8.8%, 알데하이드 0.6~0.9%로 휘발성 저급지방산의 기여도가 가장 높았다. 그리고 부지경계선은 휘발성 저급지방산 89.7%, 질소화합물 4.9%, 황 화합물 2.4%, 페놀류 1.3%, 알데하이드 0.9%, 인돌류 0.8% 순으로 조사되었다(Table 45).

돈사 환기방식은 무창형방식과 원치커튼형방식으로 구분하여 OQ와 SOQ를 상호 비교하였다. 무창형방식 양돈시설의 내부에서 악취지수는 육성돈사가 H₂S > *n*-VA > BA > CH₃SH > SKT > *p*-C > *iso*-VA > TMA > NH₃ > PA > ACHO > PHE > *iso*-VCHO > IND > PCHO > BCHO > DMS > *n*-VCHO > *iso*-BuAl > BuAc > MEK > STR > XYL > TOL > MIBK > DMDS 순이었고, 비육돈사에서는 H₂S > *n*-VA > BA > TMA > SKT > *p*-C > *iso*-VA > CH₃SH > NH₃ > PA > ACHO > PHE > *iso*-VCHO > PCHO > IND > DMS > BCHO > *n*-VCHO > *iso*-BuAl > MEK > BuAc > STR > TOL > XYL > MIBK > DMDS로 무창형 방식의 육성돈사와 비육돈사 모두 황화수소(H₂S) 성분이 가장 높은 악취지수를 보였다. 그리고 부지경계선은 *n*-VA > BA > *iso*-VA > H₂S > TMA > PA > NH₃ > *p*-C > SKT > ACHO > PHE >

BCHO > PCHO > IND > DMS > BuAc > STR > MEK > *iso*-BuAl > XYL > MIBK > TOL > CH₃SH > DMDS > *iso*-VCHO > *n*-VCHO 순으로 휘발성 저급지방산 성분인 *n*-VA 성분이 가장 높은 악취지수를 나타내었다(Table 46). 이들 분석된 악취지수를 통하여 무창형방식 양돈시설의 악취기여도를 조사한 결과에서 육성돈사와 비육돈사에서 황화합물 46.0, 55.8%로 가장 높은 악취기여도를 보였고, 부지경계선에서 악취기여도는 휘발성 저급지방산 92.4%으로 돈사 내부가 서로 다른 경향을 나타내었다(Table 47).

원치커튼형방식의 육성돈사는 *n*-VA > TMA > BA > *p*-C > H₂S > CH₃SH > *iso*-VA > SKT > NH₃ > ACHO > PA > PHE > *iso*-VCHO > IND > PCHO > BCHO > DMS > *n*-VCHO > *iso*-BuAl > BuAc > MEK > STR > MIBK > XYL > TOL > DMDS 순이었고, 비육돈사는 BA > *n*-VA > TMA > *p*-C > H₂S > *iso*-VA > CH₃SH > NH₃ > PA > SKT > ACHO > PHE > *iso*-VCHO > PCHO > IND > BCHO > DMS > *n*-VCHO > *iso*-BuAl > BuAc > STR > MEK > XYL > TOL > MIBK > DMDS 순으로 육성돈사와 비육돈사에서 휘발성 저급지방산성분들이 높은 악취지수를 나타내었다. 부지경계선에서는 *n*-VA > *iso*-VA > BA > SKT > PA > *p*-C > H₂S > ACHO > NH₃ > PHE > BCHO > TMA > PCHO > IND > DMS > BuAc > STR > MEK > XYL > TOL > MIBK > CH₃SH > DMDS > *iso*-VCHO > *n*-VCHO > *iso*-BuAl 순으로 조사되었다(Table 48). 따라서 원치커튼형방식의 돈사 내부에서 악취기여도는 휘발성 저급지방산 44.9~56.5%, 황화합물 12.9~17.7%, 질소화합물 15.1~21.1%, 페놀화합물 10.6~13.1%, 인돌화합물 1.1~3.9%, 알데하이드화합물 1.3~1.9%로 나타내었고, 부지경계선에서는 휘발성 저급지방산이 95.2%로 대부분의 악취 기여도를 차지하는 것으로 나타났다(Table 49).

위 결과로부터 환기방식에 따른 돈사형태의 악취지수와 악취기여도를 비교한 결과, 무창형방식의 돈사에서는 황화수소가 높은 악취지수를 보였고, 원치커튼형방식에서는 휘발성 저급지방산 성분들이 악취지수가 높았다. 반면에 부지경계선에서는 환기방식에 무관하게 두 형태의 돈사에서 *n*-VA 성분이 가장 높은 악취지수를 나타내었다. 그리고 악취기여도 또한 무창형방식의 내부가 황 화합물의 악취기여도가 높았고, 원치커튼형 방식은 휘발성 저급지방산 성분들이 높은 악취

기여도를 나타내었다. 부지경계선에서는 두 환기방식 모두 휘발성 저급지방산의 악취기여도가 가장 높은 것으로 조사되었다.

위의 결과를 통하여 돈사 내부는 환기방식에 따라 돈사관리 및 악취관리 방법이 필요할 것으로 판단되며, 부지경계선에서 휘발성 저급지방산을 중심으로 악취 관리를 한다면 악취 민원이 줄어들 것으로 사료된다.

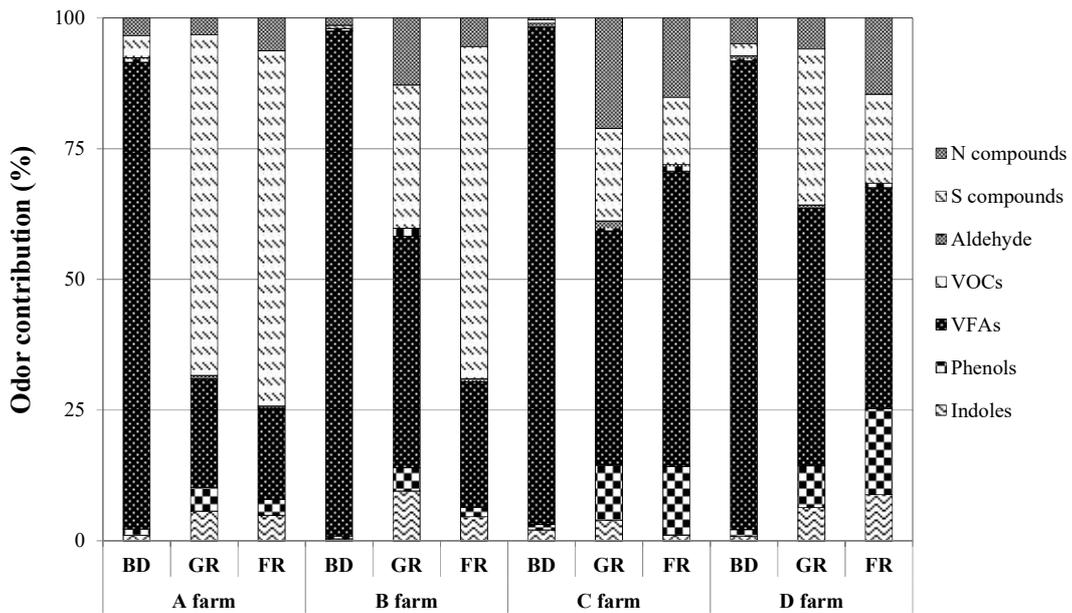


Figure 34. Comparison of odor contributions by odorous compounds in four swine farms.

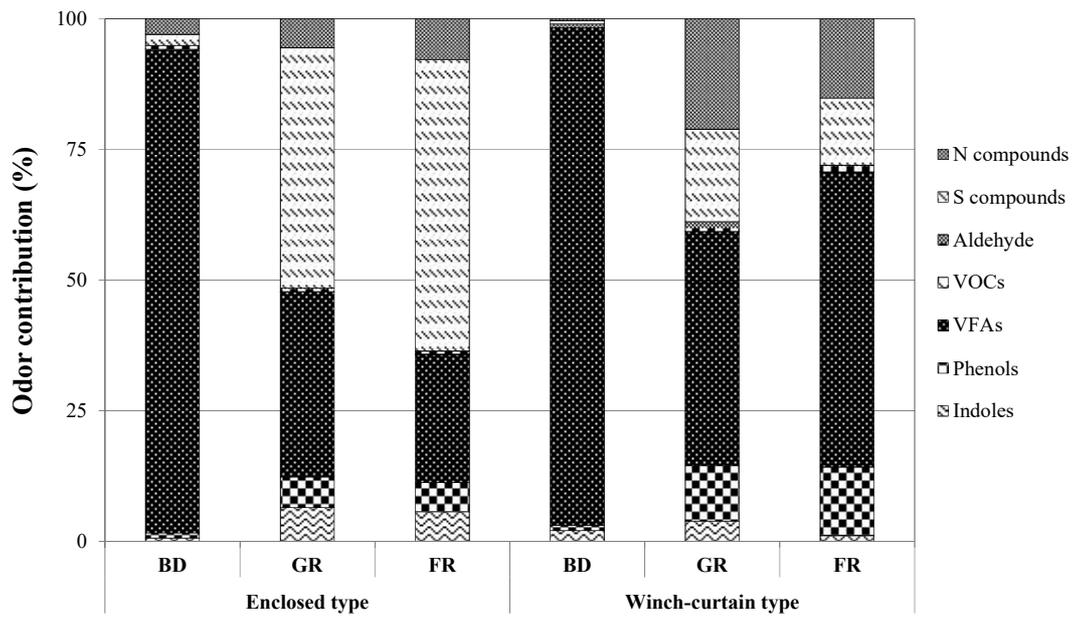


Figure 35. Comparison of odor contributions by odorous compounds in two type swine farms.

Table 38. Odor quotient (OQ) and sum of odor quotient (SOQ) of odorous compounds in A farm.

Order	BD		GR		FR	
	Compound	OQ	Compound	OQ	Compound	OQ
1	BA	172	H ₂ S	9,823	H ₂ S	13,633
2	<i>n</i> -VA	145	CH ₃ SH	2,310	<i>n</i> -VA	1,643
3	<i>iso</i> -VA	88	<i>n</i> -VA	1,708	BA	1,401
4	H ₂ S	19	BA	1,591	TMA	1,041
5	TMA	14	SKT	1,046	SKT	1,033
6	PA	5	<i>p</i> -C	780	CH ₃ SH	840
7	<i>p</i> -C	5	<i>iso</i> -VA	529	<i>p</i> -C	624
8	SKT	4	TMA	527	<i>iso</i> -VA	597
9	ACHO	3	PA	62	NH ₃	292
10	NH ₃	1	NH ₃	61	PA	67
11	PHE	1	PHE	58	ACHO	50
12	BCHO	1	ACHO	56	<i>iso</i> -VCHO	33
13	PCHO	0	<i>iso</i> -VCHO	39	PHE	25
14	IND	0	DMS	6	DMS	6
15	DMS	0	BCHO	5	PCHO	5
16	BuAc	0	IND	5	IND	4
17	STR	0	PCHO	4	BCHO	3
18	MEK	0	<i>n</i> -VCHO	1	<i>n</i> -VCHO	2
19	XYL	0	<i>iso</i> -BuAl	0	<i>iso</i> -BuAl	0
20	MIBK	0	MEK	0	MEK	0
21	TOL	0	BuAc	0	BuAc	0
22	CH ₃ SH	0	STR	0	STR	0
23	DMDS	0	MIBK	0	TOL	0
24	<i>iso</i> -VCHO	0	XYL	0	MIBK	0
25	<i>n</i> -VCHO	0	TOL	0	XYL	0
26	<i>iso</i> -BuAl	0	DMDS	0	DMDS	0
	SOQ	459	SOQ	18,612	SOQ	21,299

* BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

Table 39. Odor contribution (%) of 26 odorous compounds in A farm.

	Compound	BD	GR	FR
N-compounds	NH ₃	0.3	0.3	1.4
	TMA	3.0	2.8	4.9
	Total	3.4	3.2	6.3
S-compounds	H ₂ S	4.2	52.8	64.0
	CH ₃ SH	0.0	12.4	3.9
	DMS	0.0	0.0	0.0
	DMDS	0.0	0.0	0.0
	Total	4.2	65.2	68.0
Aldehyde	ACHO	0.6	0.3	0.2
	PCHO	0.1	0.0	0.0
	BCHO	0.1	0.0	0.0
	<i>iso</i> -VCHO	0.0	0.2	0.2
	<i>n</i> -VCHO	0.0	0.0	0.0
	Total	0.9	0.6	0.4
VOCs	STR	0.0	0.0	0.0
	TOL	0.0	0.0	0.0
	XYL	0.0	0.0	0.0
	MEK	0.0	0.0	0.0
	MIBK	0.0	0.0	0.0
	BuAc	0.0	0.0	0.0
	<i>iso</i> -BuAl	0.0	0.0	0.0
	Total	0.0	0.0	0.0
VFAs	PA	1.2	0.3	0.3
	BA	37.4	8.5	6.6
	<i>iso</i> -VA	19.2	2.8	2.8
	<i>n</i> -VA	31.6	9.2	7.7
	Total	89.3	20.9	17.4
Pheols	PHE	0.2	0.3	0.1
	<i>p</i> -C	1.0	4.2	2.9
	Total	1.2	4.5	3.0
Indoles	IND	0.1	0.0	0.0
	SKT	0.9	5.6	4.8
	Total	1.0	5.6	4.9
Total		100.0	100.0	100.0

* BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

Table 40. Odor quotient (OQ) and sum of odor quotient (SOQ) of odorous compounds in B farm.

Order	BD		GR		FR	
	Compound	OQ	Compound	OQ	Compound	OQ
1	<i>n</i> -VA	377	H ₂ S	1,316	H ₂ S	6,886
2	BA	207	I-VA	1,092	<i>n</i> -VA	1,225
3	<i>iso</i> -VA	151	BA	854	BA	1,037
4	PA	9	SKT	496	SKT	516
5	TMA	9	TMA	494	TMA	435
6	H ₂ S	4	<i>iso</i> -VA	332	<i>iso</i> -VA	383
7	<i>p</i> -C	3	<i>p</i> -C	224	CH ₃ SH	270
8	ACHO	3	NH ₃	178	<i>p</i> -C	188
9	SKT	2	CH ₃ SH	120	NH ₃	176
10	NH ₃	2	ACHO	54	PA	59
11	PHE	1	PA	43	ACHO	35
12	BCHO	0	<i>iso</i> -VCHO	18	<i>iso</i> -VCHO	26
13	PCHO	0	PHE	10	PHE	11
14	DMS	0	PCHO	3	PCHO	3
15	IND	0	BCHO	2	BCHO	3
16	BuAc	0	DMS	2	DMS	3
17	<i>iso</i> -BuAl	0	IND	2	<i>n</i> -VCHO	2
18	STR	0	<i>n</i> -VCHO	2	IND	2
19	MEK	0	<i>iso</i> -BuAl	0	<i>iso</i> -BuAl	0
20	XYL	0	BuAc	0	BuAc	0
21	MIBK	0	MEK	0	MEK	0
22	TOL	0	STR	0	STR	0
23	CH ₃ SH	0	XYL	0	XYL	0
24	DMDS	0	MIBK	0	MIBK	0
25	<i>iso</i> -VCHO	0	TOL	0	TOL	0
26	<i>n</i> -VCHO	0	DMDS	0	DMDS	0
	SOQ	770	SOQ	5,243	SOQ	11,260

* BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

Table 41. Odor contribution (%) of 26 odorous compounds in B farm.

	Compound	BD	GR	FR
N-compounds	NH ₃	0.2	3.4	1.6
	TMA	1.2	9.4	3.9
	Total	1.4	12.8	5.4
S-compounds	H ₂ S	0.6	25.1	61.2
	CH ₃ SH	0.0	2.3	2.4
	DMS	0.0	0.0	0.0
	DMDS	0.0	0.0	0.0
	Total	0.6	27.4	63.6
Aldehyde	ACHO	0.4	1.0	0.3
	PCHO	0.0	0.1	0.0
	BCHO	0.1	0.0	0.0
	<i>iso</i> -VCHO	0.0	0.3	0.2
	<i>n</i> -VCHO	0.0	0.0	0.0
	Total	0.5	1.5	0.6
VOCs	STR	0.0	0.0	0.0
	TOL	0.0	0.0	0.0
	XYL	0.0	0.0	0.0
	MEK	0.0	0.0	0.0
	MIBK	0.0	0.0	0.0
	BuAc	0.0	0.0	0.0
	<i>iso</i> -BuAl	0.0	0.0	0.0
	Total	0.0	0.0	0.0
VFAs	PA	1.2	0.8	0.5
	BA	26.9	16.3	9.2
	<i>iso</i> -VA	19.6	6.3	3.4
	<i>n</i> -VA	49.0	20.8	10.9
	Total	96.6	44.3	24.0
Pheols	PHE	0.1	0.2	0.1
	<i>p</i> -C	0.4	4.3	1.7
	Total	0.6	4.5	1.8
Indoles	IND	0.0	0.0	0.0
	SKT	0.3	9.5	4.6
	Total	0.3	9.5	4.6
Total		100.0	100.0	100.0

* BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

Table 42. Odor quotient (OQ) and sum of odor quotient (SOQ) of odorous compounds in C farm.

Order	BD		GR		FR	
	Compound	OQ	Compound	OQ	Compound	OQ
1	<i>n</i> -VA	246	<i>n</i> -VA	923	BA	1,048
2	<i>iso</i> -VA	108	TMA	758	<i>n</i> -VA	1,029
3	BA	103	BA	687	TMA	586
4	SKT	10	<i>p</i> -C	426	<i>p</i> -C	539
5	PA	10	H ₂ S	389	H ₂ S	412
6	<i>p</i> -C	4	CH ₃ SH	359	<i>iso</i> -VA	318
7	H ₂ S	3	<i>iso</i> -VA	254	CH ₃ SH	146
8	ACHO	3	SKT	159	NH ₃	70
9	NH ₃	1	NH ₃	136	PA	53
10	PHE	1	ACHO	51	SKT	45
11	BCHO	1	PA	35	ACHO	34
12	TMA	0	PHE	23	PHE	29
13	PCHO	0	<i>iso</i> -VCHO	20	<i>iso</i> -VCHO	16
14	IND	0	IND	5	PCHO	3
15	DMS	0	PCHO	4	IND	3
16	BuAc	0	BCHO	3	BCHO	2
17	STR	0	DMS	2	DMS	1
18	MEK	0	<i>n</i> -VCHO	1	<i>n</i> -VCHO	0
19	XYL	0	<i>iso</i> -BuAl	0	<i>iso</i> -BuAl	0
20	TOL	0	BuAc	0	BuAc	0
21	MIBK	0	MEK	0	STR	0
22	CH ₃ SH	0	STR	0	MEK	0
23	DMDS	0	MIBK	0	XYL	0
24	<i>iso</i> -VCHO	0	XYL	0	TOL	0
25	<i>n</i> -VCHO	0	TOL	0	MIBK	0
26	<i>iso</i> -BuAl	0	DMDS	0	DMDS	0
	SOQ	491	SOQ	4,235	SOQ	4,334

* BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

Table 43. Odor contribution (%) of 26 odorous compounds in C farm.

	Compound	BD	GR	FR
N-compounds	NH ₃	0.2	3.2	1.6
	TMA	0.1	17.9	13.5
	Total	0.3	21.1	15.1
S-compounds	H ₂ S	0.6	9.2	9.5
	CH ₃ SH	0.0	8.5	3.4
	DMS	0.0	0.0	0.0
	DMDS	0.0	0.0	0.0
	Total	0.7	17.7	12.9
Aldehyde	ACHO	0.5	1.2	0.8
	PCHO	0.1	0.1	0.1
	BCHO	0.1	0.1	0.1
	<i>iso</i> -VCHO	0.0	0.5	0.4
	<i>n</i> -VCHO	0.0	0.0	0.0
	Total	0.7	1.9	1.9
VOCs	STR	0.0	0.0	0.0
	TOL	0.0	0.0	0.0
	XYL	0.0	0.0	0.0
	MEK	0.0	0.0	0.0
	MIBK	0.0	0.0	0.0
	BuAc	0.0	0.0	0.0
	<i>iso</i> -BuAl	0.0	0.0	0.0
	Total	0.0	0.0	0.0
VFAs	PA	1.9	0.8	1.2
	BA	21.0	16.2	24.2
	<i>iso</i> -VA	22.1	6.0	7.3
	<i>n</i> -VA	50.2	21.8	23.7
	Total	95.2	44.9	56.5
Pheols	PHE	0.2	0.5	0.7
	<i>p</i> -C	0.9	10.1	12.4
	Total	1.1	10.6	13.1
Indoles	IND	0.1	0.1	0.1
	SKT	2.0	3.8	1.0
	Total	2.0	3.9	1.1
Total		100.0	100.0	100.0

* BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

Table 44. Odor quotient (OQ) and sum of odor quotient (SOQ) of odorous compounds in D farm.

Order	BD		GR		FR	
	Compound	OQ	Compound	OQ	Compound	OQ
1	<i>n</i> -VA	246	H ₂ S	4,402	BA	1,566
2	BA	174	BA	3,499	<i>n</i> -VA	1,538
3	<i>iso</i> -VA	71	<i>n</i> -VA	3,234	<i>p</i> -C	1,417
4	NH ₃	16	<i>p</i> -C	1,231	TMA	1,164
5	H ₂ S	13	<i>iso</i> -VA	1,090	H ₂ S	1,053
6	TMA	12	SKT	1,020	SKT	785
7	PA	10	TMA	786	<i>iso</i> -VA	619
8	<i>p</i> -C	6	CH ₃ SH	411	CH ₃ SH	469
9	SKT	4	NH ₃	173	NH ₃	144
10	ACHO	4	PA	148	PA	74
11	PHE	1	ACHO	73	PHE	61
12	BCHO	1	PHE	53	ACHO	58
13	PCHO	0	IND	10	IND	7
14	IND	0	<i>iso</i> -VCHO	10	<i>iso</i> -VCHO	7
15	DMS	0	PCHO	6	PCHO	6
16	BuAc	0	BCHO	4	BCHO	5
17	STR	0	<i>n</i> -VCHO	2	DMS	3
18	MEK	0	DMS	2	<i>n</i> -VCHO	2
19	XYL	0	<i>iso</i> -BuAl	0	<i>iso</i> -BuAl	0
20	MIBK	0	BuAc	0	MEK	0
21	TOL	0	STR	0	BuAc	0
22	CH ₃ SH	0	MEK	0	STR	0
23	DMDS	0	XYL	0	TOL	0
24	<i>iso</i> -VCHO	0	TOL	0	XYL	0
25	<i>n</i> -VCHO	0	MIBK	0	MIBK	0
26	<i>iso</i> -BuAl	0	DMDS	0	DMDS	0
	SOQ	558	SOQ	16,154	SOQ	8,977

* BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

Table 45. Odor contribution (%) of 26 odorous compounds in D farm.

	Compound	BD	GR	FR
N-compounds	NH ₃	2.8	1.1	1.6
	TMA	2.1	4.9	13.0
	Total	4.9	5.9	14.6
S-compounds	H ₂ S	2.3	27.3	11.7
	CH ₃ SH	0.0	2.5	5.2
	DMS	0.0	0.0	0.0
	DMDS	0.0	0.0	0.0
	Total	2.4	29.8	17.0
Aldehyde	ACHO	0.7	0.5	0.6
	PCHO	0.1	0.0	0.1
	BCHO	0.1	0.0	0.1
	<i>iso</i> -VCHO	0.0	0.1	0.1
	<i>n</i> -VCHO	0.0	0.0	0.0
	Total	0.9	0.6	0.9
VOCs	STR	0.0	0.0	0.0
	TOL	0.0	0.0	0.0
	XYL	0.0	0.0	0.0
	MEK	0.0	0.0	0.0
	MIBK	0.0	0.0	0.0
	BuAc	0.0	0.0	0.0
	<i>iso</i> -BuAl	0.0	0.0	0.0
	Total	0.0	0.0	0.0
VFAs	PA	1.8	0.9	0.8
	BA	31.1	21.7	17.4
	<i>iso</i> -VA	12.8	6.7	6.9
	<i>n</i> -VA	44.0	20.0	17.1
	Total	89.7	49.3	42.3
Pheols	PHE	0.2	0.3	0.7
	<i>p</i> -C	1.1	7.6	15.8
	Total	1.3	7.9	16.5
Indoles	IND	0.1	0.1	0.1
	SKT	0.7	6.3	8.7
	Total	0.8	6.4	8.8
Total		100.0	100.0	100.0

* BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

Table 46. Odor quotient (OQ) and sum of odor quotient (SOQ) of odorous compounds in enclosed type.

Order	BD		GR		FR	
	Compound	OQ	Compound	OQ	Compound	OQ
1	<i>n</i> -VA	256	H ₂ S	5,181	H ₂ S	7,190
2	BA	184	<i>n</i> -VA	2,012	<i>n</i> -VA	1,468
3	<i>iso</i> -VA	103	BA	1,981	BA	1,335
4	H ₂ S	12	CH ₃ SH	947	TMA	880
5	TMA	12	SKT	854	SKT	778
6	PA	8	<i>p</i> -C	745	<i>p</i> -C	743
7	NH ₃	6	<i>iso</i> -VA	651	<i>iso</i> -VA	533
8	<i>p</i> -C	5	TMA	602	CH ₃ SH	526
9	SKT	4	NH ₃	137	NH ₃	204
10	ACHO	3	PA	84	PA	66
11	PHE	1	ACHO	61	ACHO	48
12	BCHO	1	PHE	40	PHE	32
13	PCHO	0	<i>iso</i> -VCHO	22	<i>iso</i> -VCHO	22
14	IND	0	IND	6	PCHO	5
15	DMS	0	PCHO	5	IND	5
16	BuAc	0	BCHO	4	DMS	4
17	STR	0	DMS	3	BCHO	4
18	MEK	0	<i>n</i> -VCHO	2	<i>n</i> -VCHO	2
19	<i>iso</i> -BuAl	0	<i>iso</i> -BuAl	0	<i>iso</i> -BuAl	0
20	XYL	0	BuAc	0	MEK	0
21	MIBK	0	MEK	0	BuAc	0
22	TOL	0	STR	0	STR	0
23	CH ₃ SH	0	XYL	0	TOL	0
24	DMDS	0	TOL	0	XYL	0
25	<i>iso</i> -VCHO	0	MIBK	0	MIBK	0
26	<i>n</i> -VCHO	0	DMDS	0	DMDS	0
	SOQ	558	SOQ	16,154	SOQ	8,977

* BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

Table 47. Odor contribution (%) of 26 odorous compounds in enclosed type.

	Compound	BD	GR	FR
N-compounds	NH ₃	1.0	1.0	1.5
	TMA	1.9	4.5	6.4
	Total	3.0	5.5	7.8
S-compounds	H ₂ S	2.0	38.8	51.9
	CH ₃ SH	0.0	7.1	3.8
	DMS	0.0	0.0	0.0
	DMDS	0.0	0.0	0.0
	Total	2.1	46.0	55.8
Aldehyde	ACHO	0.6	0.5	0.3
	PCHO	0.1	0.0	0.0
	BCHO	0.1	0.0	0.0
	<i>iso</i> -VCHO	0.0	0.2	0.2
	<i>n</i> -VCHO	0.0	0.0	0.0
	Total	0.7	0.7	0.6
VOCs	STR	0.0	0.0	0.0
	TOL	0.0	0.0	0.0
	XYL	0.0	0.0	0.0
	MEK	0.0	0.0	0.0
	MIBK	0.0	0.0	0.0
	BuAc	0.0	0.0	0.0
	<i>iso</i> -BuAl	0.0	0.0	0.0
	Total	0.0	0.0	0.0
VFAs	PA	1.4	0.6	0.5
	BA	30.9	14.9	9.6
	<i>iso</i> -VA	17.3	4.9	3.9
	<i>n</i> -VA	43.0	15.1	10.6
	Total	92.6	35.4	24.6
Pheols	PHE	0.2	0.3	0.2
	<i>p</i> -C	0.8	5.6	5.4
	Total	1.0	5.9	5.6
Indoles	IND	0.0	0.0	0.0
	SKT	0.6	6.4	5.6
	Total	0.6	6.4	5.7
Total		100.0	100.0	100.0

* BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

Table 48. Odor quotient (OQ) and sum of odor quotient (SOQ) of odorous compounds in winch-curtain type.

Order	BD		GR		FR	
	Compound	OQ	Compound	OQ	Compound	OQ
1	<i>n</i> -VA	246	<i>n</i> -VA	923	BA	1,048
2	<i>iso</i> -VA	108	TMA	758	<i>n</i> -VA	1,029
3	BA	103	BA	687	TMA	586
4	SKT	10	<i>p</i> -C	426	<i>p</i> -C	539
5	PA	10	H ₂ S	389	H ₂ S	412
6	<i>p</i> -C	4	CH ₃ SH	359	<i>iso</i> -VA	318
7	H ₂ S	3	<i>iso</i> -VA	254	CH ₃ SH	146
8	ACHO	3	SKT	159	NH ₃	70
9	NH ₃	1	NH ₃	136	PA	53
10	PHE	1	ACHO	51	SKT	45
11	BCHO	1	PA	35	ACHO	34
12	TMA	0	PHE	23	PHE	29
13	PCHO	0	<i>iso</i> -VCHO	20	<i>iso</i> -VCHO	16
14	IND	0	IND	5	PCHO	3
15	DMS	0	PCHO	4	IND	3
16	BuAc	0	BCHO	3	BCHO	2
17	STR	0	DMS	2	DMS	1
18	MEK	0	<i>n</i> -VCHO	1	<i>n</i> -VCHO	0
19	XYL	0	<i>iso</i> -BuAl	0	<i>iso</i> -BuAl	0
20	TOL	0	BuAc	0	BuAc	0
21	MIBK	0	MEK	0	STR	0
22	CH ₃ SH	0	STR	0	MEK	0
23	DMDS	0	MIBK	0	XYL	0
24	<i>iso</i> -VCHO	0	XYL	0	TOL	0
25	<i>n</i> -VCHO	0	TOL	0	MIBK	0
26	<i>iso</i> -BuAl	0	DMDS	0	DMDS	0
	SOQ	491	SOQ	4,235	SOQ	4,334

* BD : Boundary, GR : Growing Room, FR : Fattening Room

Table 49. Odor contribution (%) of 26 odorous compounds in winch-curtain type.

	Compound	BD	GR	FR
N-compounds	NH ₃	0.2	3.2	1.6
	TMA	0.1	17.9	13.5
	Total	0.3	21.1	15.1
S-compounds	H ₂ S	0.6	9.2	9.5
	CH ₃ SH	0.0	8.5	3.4
	DMS	0.0	0.0	0.0
	DMDS	0.0	0.0	0.0
	Total	0.7	17.7	12.9
Aldehyde	ACHO	0.5	1.2	0.8
	PCHO	0.1	0.1	0.1
	BCHO	0.1	0.1	0.1
	<i>iso</i> -VCHO	0.0	0.5	0.4
	<i>n</i> -VCHO	0.0	0.0	0.0
	Total	0.7	1.9	1.9
VOCs	STR	0.0	0.0	0.0
	TOL	0.0	0.0	0.0
	XYL	0.0	0.0	0.0
	MEK	0.0	0.0	0.0
	MIBK	0.0	0.0	0.0
	BuAc	0.0	0.0	0.0
	<i>iso</i> -BuAl	0.0	0.0	0.0
	Total	0.0	0.0	0.0
VFAs	PA	1.9	0.8	1.2
	BA	21.0	16.2	24.2
	<i>iso</i> -VA	22.1	6.0	7.3
	<i>n</i> -VA	50.2	21.8	23.7
	Total	95.2	44.9	56.5
Pheols	PHE	0.2	0.5	0.7
	<i>p</i> -C	0.9	10.1	12.4
	Total	1.1	10.6	13.1
Indoles	IND	0.1	0.1	0.1
	SKT	2.0	3.8	1.0
	Total	2.0	3.9	1.1
Total		100.0	100.0	100.0

* BD : Boundary, GR : Growing Room, BY : Fattening Room

IV. 결 론

제주지역 양돈 돈사 내부(육성돈사, 비육돈사) 및 외부(부지경계선)에서 시료를 채취하여 복합악취를 측정하고, 지정악취물질(22종) 및 비지정악취물질(4종)을 분석하였다. 그리고 그 결과로부터 제주지역 양돈시설에서 발생하는 악취물질의 특성과 이들이 외부에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

복합악취를 측정한 결과, A 농장 부지경계선에서 희석배수가 174배로 가장 높은 결과를 보였고 나머지 농장에서는 71~77배이었으며, 4개 농장 모두 배출허용기준을 초과하였다.

질소계열화합물 중 암모니아 농도를 돈사 내부와 부지경계선에서 비교한 결과, A, B, C 농장 내부에서 암모니아 농도가 6.10~29.21 ppm의 범위를 보였다. 부지경계선에서는 A, B, C 농장이 0.11~0.15 ppm으로 배출허용기준치(1.0 ppm)보다 낮았으나 D 농장은 부지경계선에서 1.57 ppm으로 배출허용기준을 초과하였다. 트리메틸아민은 모든 농장의 부지경계선에서 0.01~0.45 ppb로 배출허용기준보다 낮았다.

황 화합물 중 황화수소 농도는 돈사 내부에서 159.65~5589.57 ppb, 부지경계선에서 1.26~7.90 ppb로 부지경계선과 내부에서 81.4~1571.2배 차이를 보였다. 메틸머캅탄은 내부에서 8.42~161.70 ppb, 부지경계선에서 '불검출' 수준을 나타내었고, 황화이메틸, 이황화이메틸은 돈사 내부와 부지경계선에서 배출허용기준 이하의 농도를 나타내었다. 이러한 결과로 보아 황 화합물은 부지경계선에서는 악취 기여도에 크게 영향을 미치지 않지만, 돈사 내부에서 황화수소와 메틸머캅탄은 관리가 필요한 것으로 판단된다.

알데하이드화합물인 아세트알데하이드, 프로피온알데하이드, 뷰티르알데하이드, *iso*-발레르알데하이드, *n*-발레르알데하이드 농도는 돈사 내부에서 0.19~110.09 ppb, 부지경계선에서 불검출~6.03 ppb로 배출허용기준과 최소감지농도보다 낮았고, 악취 기여도가 높지 않은 것으로 조사되었다.

휘발성유기화합물 스타이렌, 톨루엔, 자일렌, 메틸에틸케톤, 메틸 *iso*-뷰틸케톤, 뷰틸아세테이트, *iso*-뷰틸알코올 농도는 돈사 내부에서 각각 0.16, 0.23, 0.12,

2.49, 0.09, 0.08, 0.21 ppb, 부지경계선에서 0.12, 0.06, 0.05, 0.47, 0.03, 0.07, 0.04 ppb로 이 성분들 역시 악취공정법 배출허용기준 미만의 농도를 나타내었다.

휘발성 저급지방산인 프로피온산, 뷰티르산, *iso*-발레르산, *n*-발레르산 농도는 모든 농장의 부지경계선에서 49.14, 28.36, 6.29, 9.38 ppb로 배출허용기준치(30, 1.0, 1.0, 0.9 ppb)보다 각각 1.6, 28.3, 6.3, 10.4배 높은 농도를 나타내었다. 이처럼 휘발성 저급지방산은 다른 성분들보다 높은 농도를 나타내었고 양돈장에서 집중적인 관리가 필요한 물질임을 확인할 수 있었다.

페놀, *p*-크레졸, 인돌, 스카톨 농도는 돈사 내부에서 각각 9.46, 36.64, 1.35, 3.57 ppb, 부지경계선은 각각 0.29, 0.25, 0.08, 0.03 ppb로 10.0~248.4배 차이를 보였다. 그리고 이들 성분들이 돈사 내부에서는 최소감지농도보다 높지만, 부지경계선에서는 *p*-크레졸, 스카톨 성분만 높아 관리가 필요할 것으로 추정된다.

악취지수(OQ)를 조사한 결과, 무창형 방식의 A, B, D 농장에서 황화수소가 가장 높은 악취지수를 나타내었고, 원치커튼형 방식의 C 농장에서는 육성돈사와 비육돈사 내부에서 뷰티르산과 *n*-발레르산의 악취지수가 높았다. 부지경계선에서 악취지수는 모든 휘발성 저급지방산 성분들이 높은 값을 나타내어 이들 성분들이 주요 악취 원인물질임을 알 수 있었다.

악취 기여도는 무창형 농장 내부에서 황화합물이 46.0~55.8%로 가장 높고, 원치커튼형 방식에서는 휘발성 저급지방산이 44.9~56.5%로 높은 기여도를 나타내었다. 부지경계선에서는 휘발성 저급지방산의 악취기여도가 모든 농장에서 가장 높은 결과를 보였다. 반면에 비지정악취물질들은 돈사 내부에서 11.3~14.4%, 부지경계선에서 0.9~3.1%로 페놀류와 인돌류는 돈사 내부에서 관리가 필요한 것으로 판단된다.

연구를 통해 제주지역 양돈장에서 발생하는 총 26종의 악취물질 중에서 암모니아, 트리메틸아민, 황화수소, 메틸머캅탄, 프로피온산, 뷰티르산, *iso*-발레르산, *n*-발레르산, *p*-크레졸, 스카톨 등 총 10종이 양돈장 내부에서 발생하는 주요 악취물질임을 확인할 수 있었다. 그리고 부지경계선에서 휘발성 저급지방산이 높은 악취 기여도를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 돈사 내부에서 악취물질을 효율적으로 관리하기 위해서는 돈사유형에 따라 농장별로 맞춤형 관리가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

V. 참 고 문 헌

1. 강진영 (2010) 제주지역 양돈 분뇨 악취 저감 방안
2. 국립축산과학원 (2017) 축산악취 특성에 기반한 관리방안 연구, 34pp
3. 국민권익위원회 (2018) 축산 악취민원 기획조사 결과 보고서
4. 김기연, 고태중, 김치년, 김윤신, 노영만, 이철민 (2006) 밀폐형 돈사 작업장에서 발생하는 공기오염물질에 환기율의 변화가 미치는 영향, 한국보건교육건강증진학회, 82-85.
5. 김기현, 반신영, 김선태 (2005) 대기 중 암모니아 성분의 분석법 연구: UV/VIS 분광계를 이용한 간이비색계의 상대 성능평가, 한국분석과학회, 18(5), 425-430.
6. 김소진, 이진세, 최호준 (1997) 흡광광도법을 이용한 작업환경중 암모니아 분석법, 산업보건, 116, 44-49.
7. 노기환 (2004) 매립장에서 발생하는 트리메틸아민의 분석 및 배출 특성 연구. 환경관리학회지, 10(4), 241-248.
8. 류희욱, 조경숙, 이태호, 허목. 2003. 양돈시설 악취관리: I. 국내 양돈 산업 현황 및 악취 특성. 한국냄새환경학회지 제2권 제2호 69~77
9. 송정민, 양효선, 고태중, 김영주, 김기연, 강창희 (2013) 제주지역 양돈시설에서 발생하는 악취물질의 계절별 농도 및 배출 특성, 한국분석과학회지, 364-374.
10. 송정민 (2014) 제주지역 양돈시설 발생 악취물질의 특성 및 저감효과 연구, 제주대학교 대학원, 박사학위논문.
11. 신혜수, 채정석, 한진석, 박상숙, 전준민 (2016) 돈사 및 우사시설의 악취물질 채취방법 및 배출특성 연구, 한국냄새환경학회지, 15(4), 352-367.
12. 안민호 (2010) 암모니아와 황화수소 동시 측정 시스템 개발에 관한 연구, 수

- 원 대학교 대학원, 석사학위논문.
13. 오상집 (1999) 양돈장에서 발생하는 냄새의 종류와 발생원리, 월간 양돈, 11, 114-117.
 14. 오영숙, 김기현, 구윤서, 김명수, 설미진, 전승세, 최여진, 안대회 (2006) 축산 분뇨처리시설 발생 악취 특성, 한국냄새환경학회지, 5(1), 1-9.
 15. 윤병석, 임익현, 정태섭 (2003) 제지공장의 악취 및 VOCs의 발생 특성에 관한 연구
 16. 이강훈, 조성백, 박규현, 양승학, 이준엽, 오상집, 김인호, 최동윤, 유용희, 황우화 (2012) 모형 슬러리 돈사 활용한 분뇨의 저장기간별 악취물질 농도 조사, 축산시설환경학회, 18, 29-34.
 17. 이병길 (2007) 알데하이드 악취물질 측정 신뢰도 향상, 충북대학교 대학원, 석사학위논문.
 18. 이은영 (2008) 축산 환경개선제로 생산·유통되는 생균제의 문제점 및 검증방안, 한국미생물·생명공학회지, 36(2), 87-95.
 19. 이은영, 임정수 (2010) 양돈 분뇨의 악취특성 및 문제 해결을 위한 환경개선제 사용 현황 및 전망, 한국미생물·생명공학회지, 38(3), 244-254.
 20. 이은영, 이소진 (2010) 돈분뇨로부터 발생하는 암모니아의 배출 특성, 한국미생물·생명공학회지, 38(3), 308-314.
 21. 이종국 (2011) 분뇨순환 돈사의 악취특성 및 제거에 관한 연구, 조선대학교 대학원, 박사학위논문.
 22. 이창원, 유재홍, 이은영 (2012) 돈분뇨 처리과정에서 발생하는 알데히드 화합물의 발생특성, 한국냄새환경학회. 11(4), 174-183.
 23. 이하영 (2003) 양돈시설에서 발생하는 악취물질의 특성에 관한 연구.
 24. 임광희 (2019). 축사 주변의 악취 및 부유분진의 CALPUFF 모델링: 계사 중심으로, Korean Chem. Eng. Res., 57(1), 90-104.

25. 정승호, 이은희, 정영도, 김윤신 (2008) 미생물촉매가 담지된 바이오필터를 이용한 하수처리장 악취제거, 한국냄새환경학회지, Vol. 7, No. 2, 60-67.
26. 정일병 (1994) 스카톨과 옹취, 월간양돈, 16(8), 142-145.
27. 정재연 (2012) The effects of lactic acid bacteria on skatole production by clostridium drakei, Graduate School, Korea University, 석사학위논문.
28. 조성백, 양승학, 이경태, 박성권, 한덕우, 최동윤, 황옥화 (2014) 초지환원용 비육돈 슬러리의 계절에 따른 휘발성유기물과 휘발성지방산 농도 분석연구, 한국초지조사료학회지, 34(2), 125-128.
29. 통계청 (2020) 가축동향조사.
30. 환경부 (2012) 악취관리업무편람.
31. 환경부 (2016) 악취공정시험방법.
32. 환경부 (2018) 제2차 악취방지 종합시책(2019~2028).
33. 환경부 (2019) 악취관리지역 지정현황.
34. Ahn, J. W., S. K. Pandey, and K. H. Kim (2011) Comparison of GC-MS calibration properties of volatile organic compounds and relative quantification without calibration standards, Journal of Chromatographic Science, 49(1), 19-28.
35. Bernstein, J. A., N. Alexis, H. Bachus, I. L. Bernstein, P. Fritz, E. Horner, N. Li, S. Mason, A. Nel, J. Oulete, K. Reijula, T. Reponen, J. Seltzer, A. Smith, and S. M. Tarlo (2008) The health effects of non-industrial indoor air pollution, Journal of Allergy and Clinical Immunology, 121(3), 585-591.
36. Bodalal, A., J. S. Zhang, and E. G. Plet (2000) A method for measuring internal diffusion and equilibrium partition coefficients of volatile organic compounds for building materials, Building and Environment, 121(3) 585-591

37. Carter, W. P. L. (1995) Computer modeling of environmental chamber studies of maximum incremental reactivities of volatile organic compounds, *Atmospheric Environment*, 29, 2513-2527.
38. Coper, P. and I. S. Cornforth (1978) Volatile fatty acids in stored animal slurry, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 29(1), 19-27.
39. Cruwys, J. A., R. M. Dinsdale, F. R. Hawkes, and D. L. Hawkes (2002) Development of static headspace gas chromatographic procedure for the routine analysis of volatile fatty acids in waste waters, *Journal of Chromatography A*, 945, 195-209.
40. Delgado-Saborit, J. M. and V. J. Esteve-Cano (2008) Assessment of tropospheric ozone effects on citrus crops using passive samplers in a western Mediterranean area, *Agriculture Ecosystems & Environment*, 124, 147-153.
41. Fedele, R., I.E. Galbaly, N. Porter, and I.A. Weks (2007) Biogenic VOC emissions from fresh leaf mulch and wood chips of *Quercus robur* (Australian Silky Oak), *Atmospheric Environment*, 41(38), 8736-8746.
42. Grosjean, E., D. Grosjean, M. P. Fraser, and G. R. Cass (1996) Air quality model evaluation data for organics. 3. peroxyacetyl nitrate and peroxypropionyl nitrate in Los Angeles air, *Environmental Science and Technology*, 30(9), 2704-2714.
43. Haghghat, F. and H. Huang (2003) Integrated IAQ model for prediction of VOC emissions from building material, *Building and Environment*, 38, 1007-1017.
44. Hao, O. J., J.M. Chen, L. Huang and R.L. Buglass (1996) Sulfate-reducing bacteria, *Critical Reviews in Environment Science and Technology*, 26(2), 155-187.

45. Hobbs, P. J., Misselbrook, T. H., Cumby, T. R. (1999) Production and emission of odours and gases from ageing pig waste, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(3), 291-298.
46. Hoshi, J. Y., S. Amano, Y. Sasaki, and T. Korenaga (2008) Investigation and estimation of emission sources of 54 volatile organic compounds in ambient air in Tokyo, *Atmospheric Environment*, 42, 2383-2393.
47. Hung, I. F., S. A. Le, and R. K. Chen (1998) Simultaneous determination of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene in urine by thermal desorption-gas chromatography, *Journal of Chromatography B*, 706, 352-357
48. Ishaque, M., J.G. Bisailon, R. Beaudet and M. Sylvestre (1985) Degradation of phenolic compounds by microorganisms indigenous to swine waste, *Agricultural Wastes*, 13, 229-235.
49. Kely, T. J., D. L. Smith, and J. Satola (1999) Emission rates of formaldehyde from materials and consumer products found in California homes, *Environmental science and Technology*, 33, 81-88
50. Kim, K.Y. and Choi, J. H. (2013) Distribution characteristics of odorous compounds concentrations according to type of pig buildings, *Journal of Korean Society of Odor Research and Engineering*, 12(1), 27-37
51. Klarenbeek, J. V. and M. A. Bruins (1998) Ammonia emissions from livestock farming and sewage operations. Edited by Nielsen, V. C., J. H. Voorburg and P. L'Hermite. Elsevier Applied Science, London, 73-84.
52. Komenda, M., E. Parusel, A. Wedel, and R. Kopmann (2001) Measurement of biogenic VOC emissions: sampling, analysis and calibration, *Atmospheric Environment*, 35(12), 2069-2080.
53. Lie, E. and T. Welander (1997) A method for determination of the readily

- fermentable organic fraction in municipal wastewater, *Water Research*, 31(6), 1269-1274
54. Lioy, P. J., Zhang, J. (1994) Ozone in residential air: concentrations, I/O ratios, indoor chemistry, and exposures. *Indoor Air*, 4(2), 95-105.
55. Liu, P. W. G., Yao, Y. C., Tasi, J. H., Hsu, Y. C., Chang, L. P., Chang, K. H. (2008) Source impacts by volatile organic compounds in an industrial city of southern Taiwan, *Science of the Total Environment*, 398, 154-163.
56. Mackie, R. I. (1994) Microbial production of odor components. In: Proc. of international round table on swine odor control. 13-15 June at Ames, IA, USA, pp18-19.
57. McGil, A. E. J. and N. Jackson (1977) Changes in short chain carboxylic acid content and chemical oxygen demand of stored pig slurry, *Journal Science of Fod and Agriculture*, 28(5), 424-430.
58. Miller, D. N., & Varel, V. H. (2003) Swine manure composition affects the biochemical origins, composition, and accumulation of odorous compounds. *Journal of animal science*, 81(9), 2131-2138.
59. Morison, G. C. and W. W. Nazarof (2002) Ozone interactions with carpet, secondary emissions of aldehyde, *Environmental science and technology*, 36(10), 2185-2192.
60. Muehling, A. J. (1970) Gases and odors from stored swine wastes, *Journal of Animal Science*, 30, 526-531.
61. O'Neill, D. H. and V. R. Phillips (1992) A review of the control of odor nuisance from livestock building: Part 3, Properties of the odorous substances which have been identified in livestock wastes or in the air around them, *J. Agric. Eng. Res.* 53: 23-50.

62. Satsumabayashi, H., H. Kurita, Y. S. Chang, G. R. Carmichael, and H. Ueda (1995) Photochemical formation of lower aldehydes and lower fatty acids under long-range transport in central Japan,
63. Yasuhara, A., K. Fuwa, and M. Jimbu (1984) Identification of odorous compounds in fresh and rotten swine manure, *Agricultural Biological Chemistry*, 48, 3001-3010. *Atmo. Environ.*, 29(2), 255-266.
64. Sawyer, Clair N., Pery L. McCarty, and Gene F. Parkin (2003) *Chemistry for Environmental Engineering and Science*, McGraw-Hill, fifth edition, 231-232, 689-698.
65. Smith R. L., Williams R. T., (1966) *Glucuronic Acid. Free and Combined*. New York and London, Academic Press.
66. Spina, L., F. cavalaro, N. I. Fardowza, P. Lagousis, D. Bona, C. Ciscato, A. Rigante, and M. Vech (2007) Butyric acid: pharmacological aspects and routes of administration, *Digestive and Liver Disease Supplements*, 1:7-11.
67. Spoelstra, S. F. (1980) Origin of objectionable odorous components in piggery wastes and the possibility of applying indicator components for studying odour development, *Agriculture and Environment*, 5:241-260
68. Trabue, S., Kerr, B., Bearson, B., Ziemer, C. (2011) Swine odor analyzed by odor panels and chemical techniques, *Journal of Environmental Quality*, 40(5), 1510-1520.
69. Wang, Q., Z. Han, T. Wang, and R. Zhang (2008) Impacts of biogenic emissions of VOC and NOx on tropospheric ozone during summertime in eastern China, *Science Total Environment*, 395, 41-49.
70. WHO (1987) *Air quality guidelines for Europe*, WHO European Series NO 23, Copenhagen, Denmark.
71. WHO (1995) *Acetaldehyde*, *Environmental Health Criteria* 167, World

Health Organization, International Programme on Chemical Safety, Geneva, Suisse.

72. Williams, E. L. and D. Grogjean (1990) Removal of atmospheric oxidants with anular denuders, *Environment Science Technolohgy*, 24, 811-814.
73. Williams, A.G. and M.R. Evans. (1981) Storage of piggery slurry, *Agricultural Wastes*, 3:311-321.
74. Wright, D. W., Eaton, D. K., Nielsen, L. T., Kuhrt, F. W., Koziel, J. A., Spinhirne, J. P., Parker, D. B. (2005) Multidimensional gas chromatography-olfactometry for the identification and prioritization of malodors from confined animal feeding operations, *Journal of Agricultural and food Chemistry*, 53(22), 8663-8672.
75. Yasuhara, A., K. Fuwa, and M. Jimbu (1984) Identification of odorous compounds in fresh and rotten swine manure, *Agricultural Biological Chemistry*, 48, 3001-3010.
76. Yun, S. I. and Y. Ohta (2005) Removal of volatile fatty acids with Immobilized rhodococcus sp. B261, *Bioresource Technology*, 96, 41-46.
77. Zhang, S., Cai, L., Koziel, J. A., Hoff, S. J., Schmidt, D. R., Clanton, C. J., Heber, A. J. (2010) Field air sampling and simultaneous chemical and sensory analysis of livestock odorants with sorbent tubes and GC-MS/olfactometry, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 146(2), 427-432.