

축산환경의 오염 잠재력 : 축산오염 물질의 발생과 대기환경계 순환

김기현 · 김동균 · 윤종만*

상지대학교 동물자원학과

The Pollution Potential of Animal Production Systems : Origin and Atmospheric Cycling of Their Pollutants

Kim, Ki-Hyun · Kim, Dong-Kyun and Yoon, Jong-Man*

Department of Animal Science and Technology

Summary

Despite considerable progresses made in our understanding of environmental fate of pollutants stemming from animal production systems, relatively little is known about the processes and mechanisms regulating their dispersement (via emission) into and deposition from the earth's atmospheric system. Here we present and summarize up-to-date knowledge on this topic with a main emphasis on their origin, physico-chemical characteristics, and geochemical distribution behavior.

(Key words : animal production, atmospheric pollutants, emission)

서 론

축산업은 사료를 이용하여 고기, 우유, 계란 등의 가치있는 식품을 생산하는 긍정적인 기능을 발휘하는 반면, 축산폐기물(livestock wastes) 등의 발생을 야기함으로써 인해 환경보전 및 관리의 필요성을 동시에 제기하고 있다. 과학적이고 광역화된 축산시설의 개발이 점진적인 추세인 점을 고려할 때, 농축지를 기점으로 유출, 유입되는 환경오염인자들의 물동량 및 그 순환과정을 바르게 파악하는 것은 지역적인 규모의 오염 대책 수립에 있어 우선적으로 고려되어야 할 과제로 손 꼽을 수 있다.

축산폐기물의 관리 및 처리기술의 개발은 근간에 이르기까지 고체 및 액체의 형태를 띤 채

수생태계(aquatic ecosystems) 또는 토양생태계(terrestrial ecosystems)로 방출되는 오염물질들을 중심으로 이루어졌다. 그러나 오염물질의 물리화학적 특징이나 기상학적 요인 등에 따라 대기를 통한 오염물질의 유동이 수로나 토양 등의 경로를 통한 유동보다 더 중요한 역할을 할 수도 있다는 점을 감안하면^{1,2)}, 고·액체 폐기물의 유출관리에 못지않게 중요한 것이 개스 또는 입자상의 형태를 띄고 대기환경계로 방출되는 오염물질에 대하여 적절한 통제대책을 세우는 것이다. 일반적으로 개스상(gaseous phase) 오염물질들은 가축의 호흡 또는 발효의 과정을 통해 직접적인 방식으로 대기중에 방출(emission)되거나, 분뇨와 같이 고체 및 액체상으로 일차 방출된 후 혐기성 미생물들(anaerobic microbes)에

* 건국대학교, 동물자원연구센터 (Animal Resources Research Center, Kon-Kuk Univ.)

의해 분해되는 과정에서 개스로 전환하는 간접적인 경로를 거쳐 대기중에 진입한다. 이에 반해 입자상 (particulate phase) 오염물질들은 사료, 분비물, 가축의 표피 등에서 분리 생성되거나, 개스상 오염물질들이 응집하는 방식 등으로 생성되는데 (gas-to-particle conversion), 대기환경계에서 흔히 발견할 수 있는 고체 및 액체상의 유기성 에어로졸(aerosol)들을 총칭한다.

생물활동에 의해 생성·방출되는 대부분의 오염물질 들은 대개 산화도가 낮은 환원성 화합물의 형태를 띠고 있다⁹⁾. 따라서 이런 조건을 지닌 채 방출된 가스상 및 입자상 오염물질들은 대기중에 산재한 산화성 래디컬 (oxidant radical)들에 의한 산화 또는 태양광선에 의한 광분해반응(photodissociation reaction)등을 겪으며 그 물리·화학적 특성이 변하게 된다. 이러한 물질들은 액상 및 고체상 물질들과의 반응성 여하에 따라 일정시간을 대기중에 체류한 후, 다시 습윤 및 건조침적(wet and dry deposition)과 같은 세정작용(scavenging processes)을 통해 토양 또는 수환경계로 되돌아오는 생지화학적 순환(biogeochemical cycling) 현상에 종속 된다.

산업시설에서 방출되는 오염물질들과 같이, 축산 환경에서 방출된 오염물질들도 여러 형태로 지구의 자연생태계에 그 영향력을 발휘하고 있다: CO₂, CH₄, N₂O 등과 같이 지구의 온난화, NH₃, NO_x, SO_x 등과 같이 강수의 산도조절, NO₃⁻, PO₄³⁻ 등과 같이 호수나 연안 해수의 부영양화, DMS(dimethyl sulfide: (CH₃)₂S), H₂S와 같이

다단계의 산화반응을 겪으며 안개, 연무, 구름 입자의 형성에 직·간접적으로 간여하는 오염물질들이 축산환경으로부터 발생하여 지속적으로 대기환경계로 유입되고 있다. 축산시설물들에 의한 대기오염 유발의 잠재성을 감안하면, 여타 오염시설물과 마찬가지로 정확한 영향 평가의 필요성이 요구된다. 비록 최근까지 축산시설 및 폐기물에 의한 대기오염 현상이 논의될 때, 악취제거 등의 부분적인 사안에 관심이 집중된 바 있지만, 축산시설물의 개스상 또는 입자상 오염물질들에 대한 점오염원(point source)으로서의 역할에 대한 연구는 국내외적으로 지극히 미미한 상황이다. 본 논문에서는 축산업과 관련하여 발생하는 대기오염 현상에 대한 최근 간의 발표자료들을 취합하여 분석하고 비교·검토함으로써, 이러한 연구분야에 대한 관심을 제고하고자 한다.

축산환경에서 발생하는 주요 개스상/입자상 오염물질의 환경화학적 특성

Table 1은 축산환경에서 흔히 발견되며 또한 일반적인 대기환경에서 중요한 오염인자로 인식되는 일부 개스상 물질들의 개별 배경농도, 주 생성원, 지구단위의 발생량을 정리하였다. 여기에 열거된 개개의 오염물질 및 입자상 오염물질들에 대한 축산환경에서의 발생성인과 환경독성학적 특성 등에 대하여서는 아래에 구체적으로 서술하였다.

Table 1. Background concentration, major sources, and global emission rates of major gaseous constituents

Compound	Background concentration	Major sources	Global emission rate (10 ¹² g yr ⁻¹)	Ref.
HN ₃	6 ppb	soil(microbial activity)	1,200	(1)
NO _x	0.5-1 ppb	soil(microbial activity)	60	(1)
CO ₂	360 ppm	use of fossil fuel; deforestation	30,000	(2)
CH ₄	1.5 ppm	soil; swamp(methanogenesis)	1,200	(1)
(CH ₃) ₂ S	a few ppt	marine organism	20-40	(3)

(1) Godish⁹⁾, (2) UNEP¹⁰⁾, (3) Andreae¹¹⁾, Bates et al.¹²⁾

1. 암모니아(NH₃)와 질소산화물(NO_x)

대부분의 가축들이 원활한 대사활동을 하기 위해서는 상당량의 단백질 및 질소-함유물질을 소비한다. 소비된 단백질 및 질소성분의 일부는 체내에 축적되거나 우유 등의 형태로 분비되지만, 단백질의 상당부분은 분뇨의 형태로 배설된다. 위에서 더욱 자세히 언급되겠지만, 배설물을 통한 질소의 반환은 축산환경의 질소순환(nitrogen cycling)을 유도하는 대단히 중요한 현상이라 볼 수 있다. 이런 현상은 사료 등에 함유된 질소성분이 비효율적으로 이용되는데 따른 결과로 볼 수 있다¹⁾. 배설된 분뇨는 미생물들에 의해 부패되는 데, 암모니아는 이런 과정에서 생성되는 최종산물(end-product)이라 할 수 있다. 저장상태에서 또는 비료로 토양에 살포된 분뇨에 포함되어 있던 질소화합물들은 nitrification의 과정을 거쳐 질산이온(NO₃⁻)으로 산화되거나, denitrification의 과정을 거쳐(혐기성 미생물들에 이용되어) 질소가스(N₂, N₂O) 등의 부산물을 생성한다. 또는 양쪽 과정을 모두 거치면서 다양한 형태의 산화질소 화합물(NO_x = NO + NO₂)들이 생성되는데 이런 가스들은 즉각 대기로 유출된다. 소, 돼지, 가금류의 배설물에 포함된 질소화합물들이 대기를 통해 유실되는 효율에 대한 Rainelli²⁾의 연구결과는 이들 배설물이 각각 33, 16, 22%의 유실율을 보이는 것으로 밝히고 있다.

사람의 경우 약 5-50ppm의 암모니아 농도가 지속되면 냄새를 맡을 수 있고, 100-500ppm에서는 눈의 점막 등을 자극하고, 2,000-3,000ppm에서 호흡곤란을 야기하고, 10,000ppm에서는 유독한 것으로 보고된 바 있다³⁾. 돼지의 경우, 암모니아 양의 증대는 식욕부진, 호흡장애, 경련(convulsion) 등을 일으킬 수 있는 것으로 밝혀졌다⁴⁾. 그러나 암모니아의 생성율을 정확하게 예측하기는 어렵기 때문에⁵⁾, 이산화탄소와 같이 축산시설의 환기율을 결정하는 척도로 활용되지는 않는다.

2. 이산화탄소(CO₂)와 메탄(CH₄)

이산화탄소는 산소를 이용하여 호흡하는 모든 종류의 가축들에 의해 발생된다. 사람과 여러 종류의 가축이 연간 방출하는 CO₂의 양을 대략 비교하면, 成牛 - 4,000kg, 成洋 - 400kg, 돼지(체중 50kg) - 450kg, 成人 - 300kg 에 해당한다. 사람에 비해 가축의 방출량이 높은 것은 가축의 대사량이 사람보다 약 50-80% 높기 때문인 것으로 사료된다. 소와 같은 반추동물의 반추위(forestomach) 또는 돼지와 같은 단위동물(monogastric animal)의 하부장관(hindgut) 등에서는 혐기성 미생물들에 의한 유기물의 분해가 진행된다. 이런 발효생성 과정의 부산물로 나타나는 메탄과 같은 가스는 호흡 또는 트림을 통해 대기로 방출된다. 반추동물의 메탄가스 생성율은 소비하는 에너지의 약 2에서 12%에 달하는 반면, 단위동물은 약 0.3%에 불과하다¹³⁾.

대기중에서 약 360ppm의 비교적 균일한 농도를 유지하고 있는 이산화탄소는 고농도가 유지될 경우 사람 및 가축의 질식을 유발할 수도 있다. (앞의 이산화탄소 농도값은 1994년 기준이며, 매년 약 1ppm 이상씩 꾸준히 증가하는 추세에 있다.) 사람의 경우 1-2%의 농도에서 별다른 반응을 보이지 않지만, 3-5%에서 두통 및 현기증, 10%이상에서는 무의식상태의 반응을 보인다. 이러한 특성을 지닌 이산화탄소는 비교적 농도 예측이 용이하기 때문에 가축사양의 환기율을 결정하는 중요한 척도로 활용되고 있다. Hahn과 Rosentreter¹⁴⁾는 환기율을 결정하는데 다 음 식을 준용할 것을 권하였다:

$$q(v) = q(y) / (m(i) - m(o))$$

여기서 q(v)는 약 3%의 CO₂농도를 유지하는데 필요한 최저환기율(kg dry air s⁻¹), q(y)는 축사내의 CO₂ 생성율(kg s⁻¹), m(i)는 축사내의 CO₂ 농도(kg kg⁻¹ dry air), m(o)는 축사밖의 CO₂ 농도(kg kg⁻¹ dry air)를 의미한다. 축종별 최저환기율의 기준치는 0.1(소), 0.2(돼지), 0.8(닭), 0.6(토끼) m³ h⁻¹ kg⁻¹ 이다.

3. 환원황 화합물을 포함한 악취발생물질

축산분뇨에는 약 60여가지의 휘발성 물질이 존재하고 이들 중 약 12가지의 화합물은 악취(noxious odor)의 주 성분인 것으로 밝혀 졌다¹⁵⁾. 이들 주 성분물질로는 환원황 화합물, 질산화합물, 카르복시산, 페놀 등이 포함된다. Coleman 등¹⁶⁾의 연구결과는 여러 가지 악취 성분 중 H₂S 와 같은 환원황 화합물(reduced sulfur species)의 영향력을 으뜸으로 꼽았다. 돈사시설에서 기준농도치 이상으로 흔히 검출되는 환원황 화합물들로 H₂S, DMS(dimethyl sulfide - (CH₃)₂S), MeSH (methyl mercaptan), EtSH (ethyl mercaptan)등이 지목된다. 이러한 환원황 화합물들은 황산이온의 환원반응 또는 황이 포함된 아미노산의 부패반응 등을 통해 생성되며¹⁵⁾, 그 생성율은 온도 또는 분뇨의 수분함유율 등에 민감하게 변하는 것으로 보고되었다. 그 외의 악취성분들은 deamination, dehydroxylation, decarboxylation 등의 반응을 통한 단백질 부패현상의 부산물로서 대기중에 방출된다¹⁷⁾.

H₂S는 낮은 농도에서 자극성을 띄지만 고농도에서는 치명적인 독성개스로 작용한다. H₂S는 화학적으로 불안정 하여 대기로 방출되면 수분 또는 수 시간의 범위내에 산화되어 더욱 안정된 형태의 화합물로 변화한다. H₂S에 비해 상대적으로 안정된 화합물인 DMS는 대부분의 육지 및 해양생태계에서 막대한 양이 방출된다¹²⁾. 이렇게 자연적으로 발생한 황 화합물들의 절대량이 대기오염의 주 성분으로 간주되는 이산화황(SO₂), 황산(H₂SO₄) 등과 같이 산화도(oxidation state)가 높은 화합물로 변형된다. 따라서 산업시설물과 같은 인위적 생성원(anthropogenic sources)이 산화황 화합물들을 직접적으로 방출하는데 비하여, 축산시설물들은 환원황개스의 생산을 통하여 산화황 화합물(oxidized sulfur species)들이 생성되게끔 하는 자연적 생성원 역할을 수행한다고 볼 수 있다.

황 화합물을 포함한 여러 가지 악취 성분들의 조절을 위해서는 기준농도의 설정이 필요한데,

이를 위해 두 가지의 기술적인 개념이 적용된다 : 그 두 가지 개념은 크게 악취를 느끼기 시작하는 한계악취가(odor threshold values: OTVs)와 독성을 띄기 시작하는 최저독성가(lowest toxic values: LTVs)의 개념으로 분류되는데, 주 악취 성분 들의 OTVs와 LTVs값 들이 Table 2에 열거되어 있다.

Table 2. A comparison of OTVs and LTVs for various malodor compounds released from animal production systems

Compound	OTV(ppb)*	LTV(ppb)**
H ₂ S	0.5	10,000
DMS	1	1,000
MeSH	2	500
EtSH	1	500
NH ₃	4,700	25,000
Acetic acid	1,000	10,000
Phenol	5	5,000
Butyric acid	1	-
p-Cresol	1	5,000

Source: Coleman et al.^{16)**} and Muir^{22**)}.

4. 입자상 오염물질

여러 과학자들의 연구결과에 따르면, 입자상 오염물질의 농도는 동물의 종류에 따라 그리고 하루의 시간대에 따라 대단히 가변적으로 변화한다는 것이 관측되었다. 자동으로 사료를 배분하는 기기의 활용 등을 통해 가축의 유동이 특정시간대에 쏠리는 것을 방지할 수는 있지만, 반면에 가축들의 간단없는 움직임은 조대입자(coarse particle)대신 미세입자(fine particle)의 분산을 촉진할 수 있다는 반대급부적인 면을 무시할 수 없을 것이다. 축산환경으로부터 대기중에 유입된 미세입자들의 분포특성에 대한 연구들에 따르면 약 5 μ m 이하의 미세입자 수가 mg당 작게는 3,500에서 5,000개¹⁹⁾, 많게는 500,000개까지 이르는 것으로 보고되었다²⁰⁾. Table 3에는 가축의 종류에 따른 입자상 오염물질의 생성율에

대한 연구결과를 도식하였는데, 이에 따르면 돼지 또는 가금류가 소에 비해 훨씬 더 많은 양의 입자상 오염물질을 생성할 수 있음을 밝혀 주고 있다²¹⁾.

Table 3. The concentrations of particulate matters in the animal production systems

Animal	Husbandry practice	Concentration (mg m ⁻³)
Pigs	General	3~22
Cattle	Dairy cattle	0.6
Turkey	Floor housing	4~21
Laying hens	Battery	1~51
Broilers	Floor housing	6.2

Source: Jellen²¹⁾ and Muller and Wieser²³⁾.

축산환경으로부터 유출되는 입자상 오염물질은 일반적으로 사료 (80~90%), 두엄 (55~68%), 가축의 표피 (2~12%), 분비물 (2~8%), 그의 축산시설물의 바닥이나 벽 등으로 부터 분리된 물질들로 구성된다²⁴⁾. 축산시설물 내에 침전된 각종 에어로졸 성분을 분석한 결과에 따르면 약 85%가 유기성 화합물질인 것으로 밝혀졌다²⁵⁾. 이런 입자상 오염물질에 함유된 단백질 성분의 비율은 사료에 함유된 성분에 비해 훨씬 더 높는데, 이러한 성분비의 차는 가축들이 입자상 오염물질의 생성에 직접적으로 기여하고 있음을 암시한다. 입자상 오염물질들은 또한 상당한 수의 미생물을 포함하는 것으로 밝혀지는데, 돈사에서 채집한 1 그램의 먼지는 약 5천만 마리의 호기성 박테리아균을 함유하고 있는 것으로 드러난 바 있다²⁶⁾. 소, 돼지, 가금류의 축산시설물로부터 채집된 입자상 물질들의 미생물 함유량에 대한 성분분석 결과에 따르면, 약 80% 이상이 *staphylococci* 또는 *streptococci*, 1% 이상이 *fungi*, *moulds*, *yeasts* 등이고 대략 0.5%가 *coli-type bacteria*인 것으로 보고되었다²⁶⁾. 이 외에도 입자상 오염물질들은 알레르기 유발성 물질, 전염성이 강한 미생물군, 효소 등을 포함하기도

한다. 또한 입자상 오염물질들은 개스상 오염물질들을 활발히 흡착하는 기능을 갖기도 하는 것으로 밝혀진 바 있다: 예를 들어 돈사내에 축적된 먼지 1g중에서 1mg에 상응하는 개스상 오염물질(e.g., 지방산 또는 페놀 등)들이 발견된 바 있다²⁷⁾.

입자상 오염물질들이 어떻게 조성되어 있는지의 유무를 떠나 그 크기에 따른 물리적 차이는 동물 또는 가축의 호흡기에 침투정도를 결정짓는 중요한 변수로 작용한다. 연구 결과들에 따르면 지름이 약 7 μ m 이하의 크기를 갖는 입자들은 폐포에 침투할 수 있고, 침투효율은 입자의 공기역학적 상태에 좌우된다^{28, 29)}. 그러나 입자상 오염물질들이 사람 또는 가축에 미치는 영향을 그 크기, 농도 또는 미생물 개체군의 수와 같은 단순 변수에 대한 상관관계로 해석하는 데는 많은 어려움이 따른다. 이러한 변수들이 가축의 건강에 미치는 영향은 사실적인 관점에서 볼 때, 입자상/개스상 오염물질들의 복잡한 물리화학적 특성 및 축산환경의 물리적 또는 가축의 심리적 환경변수 등과 복합적으로 조화되어 반응하기 때문이다. Table 4에는 입자상 오염물질들의 농도나 成因에 대비한 가축들의 환경반응에 대한 연구결과를 도식화 하였다.

이러한 연구 결과들에 따르면 가축의 건강이나 생장율은 입자상 물질들의 크기보다 농도에 더 민감한 반응을 보이는 것을 알 수 있다. 흥미롭게도 Carpenter 등³⁰⁾은 입자상 오염물질의 부분적인 제거를 통해 돈육생산성의 향상을 입증할 수 있었다.

축산오염물질의 자연생태계 순환

아래에는 축산시설물을 중심으로 한 오염인자들의 자연생태계 순환을 이해하기 위해, 현장을 중심으로 시행된 질소화합물의 유실율에 대한 사례연구를 일차적으로 소개하고, 이에 덧붙여 비교적 많은 연구가 진행된 질소성 화합물들의 대기 유동 및 침적거동에 관한 연구결과들을 비교·해석하였다.

Table 4. Evaluation of animal health effects of particulate matters as a function of concentration and origin

Factor	Effect on the animal
High dust levels	Mechanical irritation, overloading of lung clearance, lesions of the mucous membranes
Specific microorganisms	Infectious effect: Infection by pathogens Non-specific effect: defence mechanisms stressed, reduced resistance
Dust, microorganisms, and gases	Allergic effect: over-sensitivity reaction Toxic effect: intoxication by bacterial/fungal toxins

Source: Zeiler³¹⁾.

1. 축산시설물에서의 질소성분 유실물과 지하학적 출납(budget)에 대한 고려

축산시설물 내에 반입·반출되는 질소 함유 물질의 양은 실로 막대하다. 가축 및 가축의 생산물들에 대한 채산성을 향상하기 위해 막대한 양의 질소 함유물들이 사료의 형태로 반입되어 가축들에 의해 소비되고, 이렇게 소비된 물질들의 대부분이 다시 배설물의 형태로 시설물 내에 반출된다. 막대한 양의 질소성 물질이 축산시설 내에 반입되기 때문에 이런 물질들이 주변 환경으로 유실되는 양 또한 실로 막대할 것으로 추정된다. 예를 들어, 사료 또는 배설물의 관리상태에 따라 이들 물질에 포함된 질소성분들은 다양한 수준의 미생물적 작용을 겪게 될 것이고, 그 결과로 NH₃, N₂, N₂O 개스 등이 대기로 유출되고 이들 성분은 건조 및 습윤침적에 의해 주변 또는 원거리에 위치한 토양 및 수생태계로 반출되는 것이다.

Jarvis³²⁾는 영국의 남서부 지방에 위치한 76ha 면적의 낙농목장에서 반입·반출되는 질소성 함유물의 총괄적인 출납(budget)에 대해 연구하였는데, 이러한 연구결과는 질소성분이 여러 가지 경로를 통해 순환 및 재순환작용에 종속되어 있다는 것을 보여 준다. 예를 들어 비료의 연간 총 살포량이 19,000kg N (단위 면적당 살포율이 250kg N ha⁻¹)인 이 농장에는 대기로부터의 유입, 질소의 고정작용, 사료로부터 유입과 같은 기타 경로를 통하여 6,600kg N이 추가로 들어

온다(Fig. 1 참조). 목장에 반입되는 총 25,600kg의 질소성물질중 22,000kg은 목초에 직접 흡수되어 소에게 방목되고, 이렇게 이용된 분량중 20,000kg 정도는 다시 배설물의 형태로 재반입된다. (이들 질소 유입량중 최대 12,000kg 정도는 토양에서의 미네랄화를 통해 순환 및 재순환의 과정에 종속되는 것으로 추정된다.) 이와 같이 가축에 의해 분비되는 배설물은 축산 system 내의 질소성 물질의 순환에 대단히 중요한 구성원으로 자리매김을 하고 있다고 볼 수 있다.

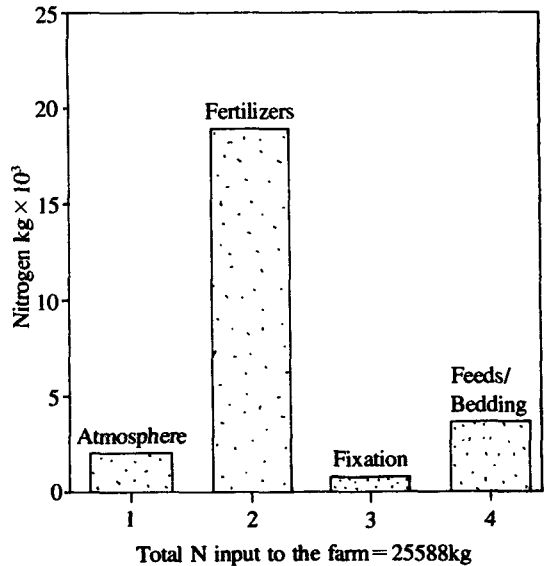


Fig. 1. Annual N inputs to a typical 76 ha dairy farm in SW England³²⁾

2. 축산오염원으로부터 발생한 오염물의 대기 순환과 자연생태계로의 침적

인구 및 산업시설물의 증대에 따라 여러 가지 오염원에서 동일한 오염물질이 생성되고 이런 물질들이 동일 시간대에 대기로 분산되는 경우가 흔하게 발생한다. 만약 축산시설물과 타오염원이 인접해 있고, 이들이 동일한 오염물질을 배출한다면, 어떤 관측지점에서 개개 오염원의 영향력을 분리하여 해석하는 데는 상당한 어려움이 따른다. 이러한 난점을 고려할 때, 축산시설로부터 발생한 오염물질의 동태를 독립적으로 분석하기 위해서는 최소한 다음의 두 가지 사항이 기본적으로 전제되어야 하겠다. 첫째, 분석하고자 하는 대상이 축산 오염시설로부터 대량으로 방출되어야 하겠고, 둘째, 타 오염원의 영향력이 비교적 배제된 지점에서 그러한 관측이 시행되어야 하겠다. 이런 전제 조건들을 감안하면, 공업시설이나 자동차와 같은 고정 및 이동 오염원들로부터 유리된 지점들로부터 발견하는 질소산화합물들의 동태에 대한 연구는 축산시설로부터 발생하는 오염물의 연구에 훌륭한 재료로 활용될 수 있다. 대부분의 질소성 화합물들은 미생물들에 의해 자연적으로 생성되거나, 농축시설물에 사용되는 무기질소성 비료, 사료, 또는 축산폐기물로부터 분리되어 토양 또는 수생태계로 반입된 물질들이라고 볼 수 있다. 아직까지 국내에서는 농·축산시설물 등에서 발생하는 대기오염물질의 환경영향평가가 거의 전무한 상황이지만, 외국의 경우 미기상학적 기법(micrometeorological method: eddy correlation법 등을 응용하여 특정인자의 침적율을 on-sight에서 직접 측정한다)과 같은 첨단분석방법을 동원하거나, 침적이 이루어진 지점에서 오염물질의 지화학적 성분을 분석하는 방법 등을 통하여 시행되고 있다.

축산시설과 인접한 수로 또는 호수 등지에 파악의 질소성분이 검출되는 것은 진부한 이야기가 되었고, 이미 북반구에 위치한 일부 자연생태계의 질소흡수력(N-absorption capacity)은 한

계점에 도달한 것으로 밝혀진 바 있다³³⁾. 암모니아와 같은 화합물들은 축산시설물에서 대량 방출되고, 건조 및 습윤침적을 통하여 대기환경에서 제거되는데, 일단 토양환경계 등에 진입하게 되면 nitrification 등의 과정을 겪으며 주변 환경을 산성화 시킨다. 이러한 오염물질이 주변환경에 축적되는 현상 또는 과정을 밝히는 것은 축산환경에서 발생한 오염물질들이 자연생태계에 침투하는 과정 및 그 후에 야기하는 여러 가지 환경폐해의 영향을 분석하는데 중요한 자료로 활용할 수 있다. 이러한 특성 때문에 암모니아에 대한 연구는 많은 과학자들의 관심을 끌었다. 예를 들어, Asman과 van Jaarsveld³⁴⁾는 축산업이 발달된 네덜란드의 일부 농촌지역에서 암모니아의 연평균 농도가 약 4mg m^{-3} 까지 달한다는 것을 밝힌 바 있고 (Table 1의 배경농도 참조), Schneider와 Hey³⁵⁾는 model prediction을 통해 네덜란드의 자연생태계로 반입되는 산성분(acidic components)의 20% 정도가 이와 같은 암모니아 류의 유입에 기인하는 것으로 결론지었다. 미기상학적 방법 등을 동원하여 암모니아의 순간 물동량을 정확하게 계측한 Duyzer 등³⁶⁾은 농·축산 system과 같은 점 오염원들이 밀집한 지역으로부터 발생한 다량의 암모니아가 대기를 통해 이동하여 주변 삼림 환경계에 대량으로 건조 침적된다는 것을 입증하였다.

암모니아와 마찬가지로 NO, NO₂와 같은 산화 질소 화합물들은 화학적으로 불안정한 화합물로 분류된다. 따라서, 대기로 방출된 후 수일 단위의 시간 이내에 더욱 안정된 질산 또는 질산이온의 형태로 변형된다. 따라서 질소화합물들이 이렇게 화학적으로 변형하는 것은 근접지역은 물론 원거리까지 이동·확산할 수 있는 능력을 부여받는 과정이라고도 볼 수 있다. 축산환경 등에서 대기로 방출된 질소성 화합물들이 원거리를 이동하므로 인해, 오염원으로부터 동떨어진 담수호 (또는 해수)와 같은 수생태계 또는 삼림생태계의 영양소 수급균형에도 영향을 끼치는 것으로 밝혀지고 있다^{33, 37)}. 대기를 통한 질소성분의 이동은 영양소 공급이 제한된 원거리

지역의 수립 또는 연안해역 등에 영양소 성분의 주 공급원 역할을 하는 긍정적인 기능을 띄기도 한다. (질소는 환경 여건에 따라 해수성분에서 제한 영양소로 작용할 수 있다.) 그러나, 완충강도(buffer capacity)가 떨어지는 담수환경의 수표면에 질산 성분 등이 지속적으로 축적되면 오히려 여러 가지 부작용을 초래하기도 한다. 담수 환경에서는 인 성분의 함량이 생물생장의 조절인자로 작용하는데, 질소성분의 과다투입은 담수 수질의 산성화 및 변질을 초래하고 또한 영양소간의 균형을 파괴하여 수환경계의 생물생장을 억제하는 것으로 드러난 바 있다³⁸⁾.

중부 유럽지역 등지에서는 이미 1950년대 이래 강수중의 질소성분(암모니아이나 질산이온 등)이 과부하인 상태로 발견되고 있고³⁹⁾, 습윤 및 건조 침적을 통한 질소의 유입율이 약 30~40kg ha⁻¹ yr⁻¹에 달하는 것으로 보고된 바 있다⁴⁰⁾. 이러한 발견과 더불어, 최근에는 오염원에서 멀리 떨어져 있는 산악지대의 호수에서 조차 질소성분의 장거리 이동에 따른 결과로 용해성 질소성분이 고농도로 검출되고 있다. 물론 질소성분의 절대치를 측정하는 것도 중요하지만, 질소성분의 농도를 인산 성분의 총량에 대비한 TN:TP (ratio of total N to total P)값 및 pH의 분포 특성을 동시에 분석하여 질소성 오염물질의 환경폐해를 진단하는 방법이 여러 과학자들에 의해 시도되고 있다. 예를 들어 Downing 과 McCauley⁴¹⁾는 호수의 표면에서 채집한 TN:TP 값이 호수의 영양상태에 따라 0.5에서 240에 이르는 다양한 값을 취하고 있다는 것을 보고하였다. 이러한 TN:TP 비율값에 대한 분석결과에 따르면, 대개 영양상태가 양호한 호수에서는 낮은 값을 (약산성 또는 중성에 가까운 pH-호수의 산성화가 약하게 진행된 경우), 반대로 영양상태가 나쁜 호수에서는 높은 값을 띄는 것으로 밝히고 있다 (대체로 낮은 pH). 이러한 TN:TP 비의 저하는 eutrophication의 진행과 동시에 목격되지만, 반대로 비율의 상승은 주어진 수생태계의 생물군이 필요로 하는 것보다 과잉으로 질소화합물이 유입될 때 형성되는 것으로 이해되고

있다.

결론 및 대책

발표된 논문 또는 참고자료의 수량만을 단순히 비교해 보더라도 축산시설물에 의해 발생하는 오염물질의 대기확산 또는 침적현상 등의 실태 또는 그러한 현상에 따른 총체적인 환경영향 폐해에 대한 국내의 학계로 부터의 관심은 아직까지 초보적인 단계에 머무르고 있다. 기존 발표된 연구결과들은 주요 무기화합물 성분의 오염인자들에 대한 환경동태분석 (analysis of environmental behavior) 등에 집중적으로 편중되어 있고, 유기화합물 또는 중금속 류에 대한 연구는 전무한 상황이다. 모든 자연환경계에 모든 종류의 오염물질들이 유사하게 분포되어 있다는 사실을 감안할 때, 그리고 사람들에 의해 매일 소비되는 축산물의 생산시설이 점오염원의 역할을 하고 있다는 점을 감안하면, 축산시설물에 의해 발생하는 오염현상과 그 폐해에 대한 총체적인 환경영향 분석은 대단히 중요하고 또한 시급하게 다루어야 할 과제 임에 틀림이 없다.

참 고 문 헌

1. Fu, J. -M. and Winchester, J. 1994a : Inference of nitrogen cycling in three watersheds of northern Florida, USA, by multivariate statistical analysis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58:1591-1600.
2. Fu, J. -M. and Winchester, J. 1994b : Sources of nitrogen in three watersheds of northern Florida, USA: Mainly atmospheric deposition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58:1581-1590.
3. Stumm and Morgan. 1981 : *Aquatic Chemistry*. New York, Wiley-Interscience.
4. Owens, F. N. 1987 : Maintenance protein requirements. In *Feed Evaluation and Protein Requirement Systems for Ruminants*.

- (Aldermann, G. and Jarrige, R. eds) CEC Luxembourg.
5. Rainelli, P. 1989 : Agricultural and Environmental Policies: Opportunities for Integration. OECD, Paris.
 6. Bruce, J. M. 1981 : Ventilation and temperature control criteria for pigs. In Environmental Aspects of Housing for Animal Production (Clark, J. A. ed). London, 197-216.
 7. Stombaugh, D. P., Teague, H. S. and Roler, W. L. 1969 : Effect of atmospheric ammonia in the pig. *J. Animal Sci.* 28:844-847.
 8. Robertson, A. M. and Galbraith, H. 1978 : Effect of ventilation on the gas concentration in a part-stalled piggery, R & D Studies 1, Scottish Farm Buildings Investigation Unit, 17-28.
 9. Godish, T. 1991 : Air Quality, Lewis Pub.
 10. UNEP. 1991 : Environmental Data Report, 3rd Ed.
 11. Andreae, M. O. 1990 : Ocean/atmosphere interactions in the global biogeochemical sulfur cycle. *Mar. Chem.*, 30:1-29.
 12. Bates, T. S., Cline, J. D., Gammon, R. H. and Kelly-Hansen, S. R. 1987 : Regional and seasonal variations in the flux of oceanic dimethylsulfide. *J. Geophys. Res.*, 92:2930-2938.
 13. Noblet, J., Fortune, H., Dubois, S. and Henry, V. 1989 : Nouvelles bases d'estimation des teneur en energie digestible metabolisable et nette des aliments pour le porc. INRA, Paris, 1-106.
 14. Hahn, R. H. and Rosentreter, E. E. 1987 : ASAE standards, ASAE, St. Joseph, 351-448.
 15. Spolestra, S. F. 1978 : Microbial aspects of the formation of malodorous compounds in anaerobically stored piggery waste. PhD Thesis, Agricultural University, Wageningen.
 16. Coleman, R. N., Feddes, J. J. R. and West, B. S. 1991 : What is odour and the potential for its control? In Proc. Western Branch Meeting. Canadian Society of Animal Production, Chilliwack (Abstract).
 17. Verstegen, M., Tamminga, S. and Greers, R. 1994 : The effect of gaseous pollutants on animals. In Pollution in Livestock Production Systems (Dewi, I. A. et al. eds), Cab International, Wallingford, UK.
 18. Kim, K. -H. and Andreae, M. O. 1992 : Carbon disulfide in the estuarine, coastal, and oceanic environments. *Mar. Chem.*, 40:179-197.
 19. van Wicklen, G. L. and Yoder, M. F. 1988 : Respirable particle concentrations in naturally ventilated broiler housing. *Transactions American Society Agricultural Engineering* 31:1794-1798.
 20. Whyte, R. T., Williamson, A. M. and Laecy, J. 1993 : Air pollutant and respiratory impairment of poultry house stockmen. In Livestock Environment, Univ. of Warwick, UK.
 21. Jellen, E. G. 1984 : Gravimetrische und bakteriologische Styaubuntersuchungen in zwei Legehennenst Fallen. Dissertation, School of Veterinary Medicine, Hanover.
 22. Muir, G. D. 1977 : Hazards in the Chemical Laboratory. The Chemical Society, London.
 23. Muller, W. and Wieser, P. 1987 : Dust and microbial emissions from animal production. In Animal Production and Environmental Health (Strauch, D. ed) Elsevier, 47-89.
 24. Hartung, J. 1986 : Dust in livestock buildings as a carrier of ordours. In Ordour Prevention and Control of Organic Sludge and Livestock Farming (Nielsen, V. C. et al., eds.) Elsevier, London 321-332.
 25. Aengst, C. 1984 : Zur Zusammensetzung des Staubes in einem Schweinemaststall, Thesis, School of Veterinary Medicine, Hanover.

26. Hartmann, F. 1980 : Experimentelle Untersuchungen über die atmosphärische Ausbreitung von Luftkeimen aus Stallanlagen und aus künstlichen Keimquellen. Dissertation. University Hohenheim.
27. Hartung, J. 1985 : Gas chromatographic analysis of volatile fatty acids and phenolic/indolic compounds in pig house dust after ethanolic extraction. Environ. Tech. Letts. 6:21-30.
28. Vincent, J. H. and Mark, D. 1981. The basis of dust sampling in occupational hygiene: A critical review. Annals of Occupational Hygiene 24:375-390.
29. Henschler, D. 1990 : Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und biologische Gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. 26 Weinheim, Germany.
30. Carpenter, G. A., Cooper, A. W. and Wheeler, G. E. 1986 : The effect of air filtration on air hygiene and pig performance in early-weaner accommodation. Animal Production 43:505-515.
31. Zeitler, M. 1988 : Hygienische Bedeutung des Staubes- und Keimgehaltes der Stallluft. Bayer. Landwirtschaftl. Jahrbuch 65:151-165.
32. Jarvis, S. C. 1993 : Nitrogen cycling and losses from dairy farms. Soil Use and Management.
33. Henriksen, A. and Brakke, D. F. 1988 : Increasing contributions of nitrogen to the acidity of surface waters in Norway. Water, Air, Soil Pollt. 42:183-201.
34. Asman, W. A. H. and Jaarsveld van, J. A. 1990 : A variable resolution statistical transport model applied for ammonia and ammonium. RIVM Rep. 228:471-007
35. Schneider, T. and Hey, G. J. 1990 : Dutch priority programme on acidification. Thematic Rep. 200-07, RIVM, Bilthoven, The Netherlands.
36. Duyzer, J. H., Verhagen, H. L. M. and Weststrate, J. H. 1992 : Measurement of the dry deposition flux of NH₃ on to coniferous forest. Environ. Pollut. 75:3-13.
37. Jambert, C., Delmas, R. A., Labroue, L. and Chassin, P. 1994 : Nitrogen compound emissions from fertilized soils in a maize field pine tree forest agrosystem in the southwest of France. J. Geophys. Res. (D-Atmosphere), 16:523-16:530.
38. Stoddard, J. L. 1994 : Long-term changes in watershed retention of nitrogen. In Environmental Chemistry of Lakes and Reservoirs. Adv. Chem. 237 ACS.
39. Rhode, H and Rood, M. J. 1986 : Temporal evolution of nitrogen compounds in Swedish precipitation since 1955. Nature 321:762-764.
40. Grennfelt, P. and Hultberg, H. 1986 : Effects of nitrogen deposition on the acidification of terrestrial and aquatic ecosystems. Water, Air, Soil Pollt., 30:945-963.
41. Downing, J. A. and McCauley, E. 1992 : The nitrogen:phosphorous relationship in lakes. Limnol.Oceanogr. 37:936-945.