

T0009576

최 중
연구보고서

GOVP120062827

축산관련시설의 악취제어를 위한 흡착성

액상포말-미생물담체 및

이동식 현장적용시스템의 개발

Development of Aqueous Foam-Microbial
Media to Control Odorous Gas Emissions in
Livestock Related Facilities

주관연구기관: 서울대학교

협동연구기관: (주)환경바이오

농 립 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “축산관련시설의 악취제어를 위한 흡착성 액상포말-미생물담체 및 이동식 현장적용시스템의 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2006 년 6 월 26 일

주관연구기관명 : 서울대학교

총괄연구책임자 : 남 경 필

세부연구책임자 : 남 경 필

연 구 원 : 이 승 룡

연 구 원 : 한 준 경

연 구 원 : 박 주 영

협동연구기관명 : (주)환경바이오

협동연구책임자 : 전 숙 례

요 약 문

I. 제 목

축산관련시설의 악취제어를 위한 흡착성 액상포말-미생물담체 및 이동식 현장적용시스템의 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 우리나라는 국민소득의 향상과 서구 식문화의 대중화로 육류에 대한 소비량이 갈수록 증대되고 있다. 특히, 생활 여건의 개선으로 더 많은 돈을 주고서라도 보다 청결하고 좋은 환경에서 길러진 양질의 육류를 구입하고자 하는 소비자들이 늘고 있으며, 이로 인하여 청정 지역에서 생산되고 있음을 강하게 홍보하는 수입 육류에 비하여 국산 축산 상품은 상대적으로 열악한 환경에서 생산되고 있다는 이미지 때문에 그 경쟁력이 점차 떨어지고 있는 실정이다.

축산업에 대한 이미지를 악화시키는 가장 커다란 요인 중 하나는 바로 악취이다. 악취는 외국에 비해 인구집약도와 가축집약도가 큰 우리나라에서 더 큰 문제가 되고 있다. 악취는 인간에게 정신적, 심리적 피해를 끼치는 감각공해이며, 축산관련 시설에 대한 집단민원의 주된 발생 대상으로, 악취를 효과적으로 제어하는 것은 축사 등과 같은 축산관련시설에 대한 일반인들의 인식을 개선시킬 수 있는 방안으로 기대된다. 또한, 악취의 농도가 높아지면 작업을 하는 사람의 작업 능률은 물론, 가축의 생육에도 큰 지장을 줄 수 있으므로, 작업장 환경을 쾌적하게 변화시키는 것은 축산농가의 생산성 향상의 측면에서도 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

현재 악취제어기술은 악취유발매질의 다양성으로 인하여 확실한 해결책이 없는 실정이며, 바이오 필터와 같은 기존의 설치형 악취제어 시설들은 효율적이지 못하다는 지적을 받고 있다. 따라서 본 연구에서는 축산관련시설에서 발생하는 악취를 확산단계에서부터 차단하여 보다 효과적으로 제어할 수 있는 신기술을 개발하고자 한다. 흡착성 액상포말-미생물 담체를 이용하여 악취 물질의 대기 중 확산을 물리적으로 차단할 뿐만 아니라 생분해를 통하여 악취물질을 저감시킬 수 있는 방안을

모색하고 그 효과를 검증하는 것이 본 연구의 목적이다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구의 목적이 악취원에 직접 적용할 수 있는 현장적용 악취제어 시스템의 개발인 만큼, 악취의 발산을 효과적으로 차단하고 악취 발생 물질을 분해 할 수 있는 매질을 개발하는 한편 이를 현장에 효율적으로 적용 할 수 있는 방안까지 모색하고자 하는 것이 본 연구의 핵심 전략이다. 본 연구에서는 악취 확산 차단의 매질로써 액상포말을 선정하였고 따라서 본 연구의 내용은 다음의 두 분야로 크게 나누어 볼 수 있다. 악취분해 미생물을 함유한 포말형 액상담체의 개발과 이를 이용한 이동식 현장적용시스템의 개발이 그것이다.

연구개발의 주요 과정은 다음과 같다. 먼저 주요 악취발생물질을 분해할 수 있는 미생물들을 선별하여 배양하는 한편, 악취의 확산을 효과적으로 막고 미생물의 성장 배지로써도 이용이 가능한 액상포말의 구성성분을 결정하였다. 그리하여 미생물의 포말 내 생존 여부와 악취 물질 분해 여부를 확인하며 액상포말-미생물 담체의 효과를 검증하였다. 이동식 현장적용시스템은 액상포말-미생물담체를 현장에 효율적으로 적용할 수 있도록 제작하는 것이 목적이었으며, 포말이 안정적으로 형성되는지 여부와, 사용의 편리성과 안전성을 향상시키기 위한 실험을 진행하였다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

본 연구의 결과로 악취를 효과적으로 제어할 수 있는 안정적인 액상포말-미생물담체를 개발하였으며 그 효과도 검증하였다. 이동식 현장적용시스템의 개발도 성공적으로 이루어졌으며 이는 악취제어분야의 신기술로서 뿐만 아니라 상품화를 통한 가치 창출의 도구로서의 의의도 가진다고 볼 수 있다. 다음은 주요 연구 단계에서의 결과를 요약한 것이다.

1. 축산관련시설에서의 악취 물질 분석

축산관련시설에서 많이 발생하는 주요 악취 물질은 문헌자료를 이용하여 조사

를 하였다. 축산관련시설, 특히 돈사에서 많이 발생하는 악취 물질로는 휘발성 지방산 (Volatile Fatty Acid, VFA), 암모니아, 황화수소 및 황 화합물, indole, scatole, cresol 등이 존재하는 것으로 조사되었으며, 이 중 무기성 물질인 암모니아와 황화수소가 악취에 대하여 상대적으로 큰 비중을 차지하는 것으로 확인되었다.

2. 악취 물질 분해 미생물 선별 및 배양

악취 물질 분해 미생물은 활성슬러지를 연속식 미생물배양장치에 넣어 장기간 가동함으로써 가축분뇨에서 발생하는 기체상 물질들을 영양원으로 이용할 수 있는 종들만 선택적으로 선별하여 배양하였다.

3. 안정적인 액상포말의 구성성분 결정

포말의 50% 배수시간과 포말지속시간, 팽창비 등을 측정하여 안정적인 포말을 생성하기 위한 최적의 구성성분과 비율을 결정하였다. 최종 포말 구성성분은 keratin 30%, FeCl₂ 0.2%, ethylene glycol 10%, saponin 0.3%, FeSO₄ 5%로, 이 때의 50% 배수시간은 1,440 분, 포말지속시간은 4,800 분, 팽창비는 39.5 배, 밀도는 1.10 g/cm³ 로 측정되었다.

4. 미생물과 액상포말의 친화성 연구

미생물을 본 연구에서 개발한 포말에 주입한 후, 48 시간 경과 후에 미생물 개체군 수를 세어 보았을 때, 처음 주입하기 전과 차이가 없음을 확인했으며, 미생물로 인하여 포말의 50% 배수시간이나 팽창비가 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다. 또한, 포말 생성 시 가해지는 고압에 대한 미생물의 생존 실험 역시 아무 문제가 없는 것으로 관찰됨으로써, 액상포말과 미생물 간의 상호적합성에 아무런 문제가 없는 것으로 확인되었다.

5. 개발한 액상포말-미생물담체의 효능 시험

본 연구에서 개발한 액상포말-미생물담체를 가축의 분뇨 위에 30 cm 두께로 덮은 후, 1,440 분이 경과된 후에 초기 암모니아와 황화수소의 농도와 비교한 결과 각각 90%, 75%가 감소했음을 확인하였다.

6. 현장적용시스템 개발

현장에서 액상포말담체를 바로 생성하여 적용할 수 있는 이동식 포말발생기를 현장적용시스템으로 제작하였다. 이동식 현장적용시스템은 사용의 편리성, 내구성, 이동성 등이 고려되었으며 시험 결과 본 연구에서 설계 및 제작한 기기가 정상적으로 작동하는 것을 확인하였다.

7. 현장적용성 검증

제작한 기기에서 생성한 액상포말담체가 실험실용 포말발생기에서 발생시킨 포말과 같은 성질을 가지는지에 대하여 실험한 결과, 차이가 거의 없어 제작한 이동성 현장적용시스템이 현장에서 악취를 제어하는데 바로 사용 될 수 있음을 확인하였다.

SUMMARY

I. Title

Development of Aqueous Foam-Microbial Media to Control Odorous Gas Emissions in Livestock Related Facilities

II. Purpose of research

With the improvement of common life standard and prevalence of western culture, the consumption of meat products are gradually increasing in Korea. Especially, with the rise of average income and awareness of healthy foods, more consumers are now finding food products which are produced more hygienically and has better quality. Food companies are now sending out advertisements emphasizing the hygienic production of their products and this proves that nowadays images of the product and also its producing process is a significant factor of marketing.

One of the main cause giving unfavorable images of stock farm products is odor. In lot of cases, odor acts as a measure of cleanness. Thus by controlling odor, prejudice of livestock relative facilities and stock farm products of common people can be improved. In addition, high concentration of odorous gas can cause various disease to the stock animals and suppress the efficiency of the farm workers. Therefore, reducing odor can bring economical benefit to the stock farmers.

Current odor-controlling technologies does not yet provide us a powerful solution for odors. Most of the existing technologies reduces odorous gases after they spread out to the atmosphere and thus makes it inefficient. Therefore, in this research, a new technology that can isolate the odor source and prevent it from spreading out will be developed. A foam media will be

developed to physically cover the odor source and block the emission of the odorous substances. And additionally, by injecting odor-degrading microorganisms to the foam media, reduction of odor substance will also be attempted.

III. Contents and scope of research

Because the main purpose of this research is to develop an *in situ* odor controlling system that can directly block the emission of the odor, finding an appropriate media and an efficient way to apply the media will be the core strategy of this study. This research will cover two tasks.

- developing an aqueous foam-microbial media that can retain and degrade odor substance
- designing an *in situ* odor controlling system that can efficiently apply the foam media

IV. Research results and suggestions for future utilization

Through this result a stable foam-microbial media that can effectively control odor was developed. And the *in situ* foam generator was also built and showed successful results. The results prove that this foam-microbial media application can fulfill itself as a new odor controlling technology, and it can also be expected to redevelop as a commercial product in the near future. The detailed experiment results are as followed.

1. Analysis of odorous gas in livestock related facilities

Substances that act as the main source of odor in livestock related facilities was surveyed by looking through various references. The most dominant odorous substance was found to be Volatile Fatty Acid (VFA), ammonia,

hydrogen sulfide, indole, scatole, cresol and etc. Among these chemicals ammonia and hydrogen sulfide was reported to have the highest concentration.

2. Isolation and cultivation of odor degrading microorganisms

Odor degrading microorganisms were isolated and cultivated using a chemostat. The microorganisms were originated from active sludge.

3. Determination of aqueous foam composition

To form a stable foam media an optimum composition was determined. The components are keratin 30%, FeCl₂ 0.2%, ethylene glycol 10%, saponin 0.3%, FeSO₄ 5%. The foam properties were as followed; 50% drainage time: 1,440 min, foam remaining time: 4,800 min, expansion ration: 39.5, density: 1.10 g/cm³.

4. Study on compatibility of foam and microorganisms

Experiments results showed that the generated foam was possible to be used by microorganisms, and the microorganisms can survive inside the foam solution and foam even during the foam generating process.. And also, the foam stability was undisturbed by the microorganisms.

5. Performance test of aqueous foam-microorganism media

By covering the odor source with the foam media by a thickness of 30 cm, the concentration of ammonia and hydrogen sulfide was reduced by 90 and 75% respectively after 1,440 min from application.

6. Layout of *in situ* foam generator

An *in situ* foam generator was designed considering conveniency, durability, safety and mobility.

7. Verification of field applicability

An *in situ* foam generator was built based on the designed layout. The foam generator was tested to prove that the generated foam was capable to control odor and readily applicable.

CONTENTS

Summary	2
Chapter 1. Research Introduction	14
1. Necessity of research	14
2. Purpose and scope of research	15
Chapter 2. Current Technical State	18
1. Domestic and foreign technical state	18
Chapter 3. Research Contents and Results	20
1. Summary of research process	20
2. Experiment methods	23
2.1. Analysis of odorous gas in livestock related facilities	23
2.2. Isolation and cultivation of odor degrading microorganisms ..	23
2.3. Study on odor degrading microorganisms	24
2.4. Development of lab-scale foam generator	25
2.5. Determination of aqueous foam composition	26
2.6. Odor control by aqueous foam	27
2.7. Study on compatibility of foam and microorganisms	28
2.8. Performance test of aqueous foam-microorganism media	29
2.9. Performance test with ammonia-binding additives	30
2.10. Layout of <i>in situ</i> foam generator	31
2.11. Verification of field applicability	31
3. Results and discussions	32
2.1. Analysis of odorous gas in livestock related facilities	32
2.2. Isolation and cultivation of odor degrading microorganisms ..	32
2.3. Study on odor degrading microorganisms	35

2.4. Development of lab-scale foam generator	39
2.5. Determination of aqueous foam composition	40
2.6. Odor control by aqueous foam	48
2.7. Study on compatibility of foam and microorganisms	56
2.8. Performance test of aqueous foam-microorganism media	58
2.9. Performance test with ammonia-binding additives	60
2.10. Layout of <i>in situ</i> foam generator	68
2.11. Verification of field applicability	74
4. Conclusion of research	84
Chapter 4. Achievements	88
1. Annual achievement report	88
2. Contribution to related industries	91
Chapter 5. Application plan of research results	92
1. Application plan of research results	92
2. Future expectations	92
Chapter 6. Updating technical information	94
1. Introduction of odor	94
2. Odor controlling technologies	97
3. Odor control mechanism by microorganisms	101
4. Foam generating mechanism	103
5. Foam generating components and additives	104
Chapter 7. References	106

목 차

요 약 문	2
제 1 장 연구개발과제의 개요	14
제 1 절 연구개발의 필요성	14
제 2 절 연구개발의 목표 및 내용	15
제 2 장 국내·외 기술 현황	18
제 1 절 국내·외 관련기술의 현황 및 전망	18
제 3 장 연구개발 내용 및 결과	20
제 1 절 연구개발의 단계별 수행 내용 요약	20
제 2 절 연구 수행 방법	23
1. 축산관련시설의 주요 악취성분에 대한 조사	23
2. 악취 분해 미생물군의 분리 및 배양	23
3. 악취 분해 미생물에 관한 연구	24
4. 실험실용 포말발생기의 제작	25
5. 흡착성 액상포말의 구성성분 결정	26
6. 액상포말에 의한 악취제어 효과 조사	27
7. 포말에서의 미생물 안정성 연구	28
8. 액상포말-미생물 담체의 성능 조사	29
9. 악취제어 첨가물질의 주입에 의한 악취제어 효과 조사	30
10. 원 위치 생산 현장적용시스템의 설계	31
11. 현장적용가능성 검증	31
제 3 절 연구 수행 내용 및 결과	32
1. 축산관련시설의 주요 악취성분에 대한 조사	32
2. 악취 분해 미생물군의 분리 및 배양	32
3. 악취 분해 미생물에 관한 연구	35

4. 실험실용 포말발생기의 제작	39
5. 흡착성 액상포말의 구성성분 결정	40
6. 액상포말에 의한 악취제어 효과 조사	48
7. 포말에서의 미생물 안정성 연구	56
8. 액상포말-미생물 담체의 성능 조사	58
9. 악취제어 첨가물질의 주입에 의한 악취제어 효과 조사	60
10. 원 위치 생산 현장적용시스템의 설계	68
11. 현장적용가능성 검증	74
제 4 절 연구개발의 결론	85
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	88
제 1 절 연차별 연구목표 달성도	88
제 2 절 관련분야에의 기여도	91
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	92
제 1 절 연구개발결과의 활용계획	92
제 2 절 기대효과	92
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	94
제 1 절 악취	94
제 2 절 악취 제어 기술	97
제 3 절 미생물에 의한 악취 제거 메커니즘	101
제 4 절 포말 형성 메커니즘	103
제 5 절 포말성분 및 첨가제	104
제 7 장 참고문헌	106

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 필요성

축산관련시설 등에서의 악취제어기술에 대한 필요성은 다음과 같이 사회·문화적 측면, 경제·산업적 측면, 기술적 측면의 세 가지로 분류해 볼 수 있다.

1. 사회·문화적 측면:

가. 악취는 인체위해성보다는 정신적, 심리적 피해를 끼치는 감각공해이며 집단민원의 주된 발생 대상이므로 효과적인 악취제어를 통한 사회, 문화적 파급효과는 지대함.

나. 특히, 축산관련시설에서 악취의 제어를 통한 쾌적한 작업장 및 주변 환경의 조성은 축산시설에 대한 일반인들의 불쾌감과 같은 인식을 새롭게 하고 나아가 일부에서 축산업이 환경오염산업으로 인식되고 있는 점들을 개선하는 효과가 기대됨.

2. 경제·산업적 측면:

가. 대단위 축산시설에 기인하는 악취는 현장 작업자의 작업의욕을 저하시켜 생산성의 감소를 초래할 수 있으며 경우에 따라서는 악취농도의 심각성으로 인해 가축 자체의 생산성 저하도 초래할 우려가 있음.

나. 악취는 일반인들에게 축산시설에 대한 불쾌한 인식을 심어주는 가장 큰 요인으로, 국내 많은 축사의 악취 문제는 국내 축산상품의 질에 대한 인식을 격하 시키는 작용을 하고 있으며 이는 장기적으로 우리나라 축산업의 경쟁력을 저하시킬 수 있음

3. 기술적 측면:

- 가. 악취제어기술은 악취유발매질의 다양성 (산업시설, 쓰레기매립장, 축산농가 등)으로 인해 대기, 매립, 축산 등 각 분야에서 활발히 진행되고 있으나 아직 확실한 대안이 없는 실정임.
- 나. 현재 가장 일반적으로 사용되는 설치형 바이오필터는 주로 악취시설 전체 (예; 축사전체)의 공기에 대한 정화의 개념이므로 악취원인물질 (예; 가축분뇨)에 대한 직접적인 정화가 되지 못하며 설치 및 운전비용이 많이 소요됨.
- 다. 따라서 본 연구팀은 그동안의 바이오필터 공법에 관한 연구 경험을 바탕으로 현장에서 보다 간편하고 신속하게 악취오염원에 작용하여 제어가 가능한 새로운 형태의 반응매질 및 현장 적용 시스템을 개발하고자 함.

제 2 절 연구개발의 목표 및 내용

1. 연구개발 목표와 내용

- 가. 본 연구의 목표는 기존의 설치형 악취제어 시스템의 단점을 극복하여 악취유발오염원에 대한 신속하고 직접적인 제어가 가능한 간편한 현장적용 시스템을 개발하는 데 있음. 구체적으로, 축산관련시설에서 유래하는 악취를 신속하고 효과적으로 제어할 수 있는 새로운 기술을 개발하고자 하며 다음의 두 분야로 크게 나눌 수 있음.
 - 1) 악취분해 미생물을 포함한 포말형 액상담체의 개발
 - 2) 액상포말-미생물담체를 이용한 이동식 현장적용시스템의 개발
- 나. 특히, 연구기간 내 원활한 목표달성을 위하여 다음의 사항에 주안점을 두고 연구를 진행하고자 함.
 - 1) 사육규모와 발생악취의 심각성에 근거하여 제어가 가장 시급한 돈사악취에 대한 처리 방안을 중점적으로 연구함.
 - 2) 기존에 알려진 특정 악취 (예; 암모니아, 아민 등) 분해미생물을 적극

활용하여 악취제어를 하는 방향으로 연구를 진행하고 새로운 군주 (consortium)를 분리, 동정을 최소화하며 컨소시움에 대한 동정은 미생물의 16S rRNA를 이용하여 실시하고자 함.

3) 따라서 악취물질 중 축산 분뇨에서 주로 문제가 되는 암모니아 및 황화합물의 악취를 우선적으로 제어하는 시스템을 개발하고자 함.

다. 흡착성 액상포말-미생물담체 및 이동식 현장적용시스템 (sorptive aqueous foam-microbial medium and portable *in situ* application system)은 오염 시설에서 발생하여 공기 중에 존재하는 악취물질에 대한 제어보다는 오염원에 직접 살포하여 악취물질이 대기 중으로 발산이 이루어지기 전에 제어하는 것을 목표로 함.

라. 흡착성 액상포말-미생물담체는 액상포말 (aqueous foam)과 특정 미생물군 (microbial community)으로 구성될 예정이며, 악취물질이 액상포말에 의해서 오염원으로부터 대기 중으로의 확산이 방지되고 흡착되는 동안 액상포말 내에 존재하는 특정 미생물군에 의해 분해 (biodegradation) 또는 무기물화 (mineralization)되는 것을 목표로 함.

마. 계면활성제 (surfactant) 등을 이용한 액상포말 생산 기술 자체는 이미 타 분야 (먼지제어, 석유자원 회수율 향상, 지하수 및 토양오염물질 정화 등)에서 개발되어 일부 이용이 되고 있거나 시도되고 있는 상태이지만, 본 연구에 이용되는 액상포말은 확산방지뿐만 아니라 악취분해미생물군의 성장배지 (growth medium)의 역할도 하므로 액상포말의 구성성분에 대한 연구를 통하여 새로운 성분을 개발할 하고자 함.

바. 이동식 현장적용시스템은 실험실에서 개발된 담체제조 기술이 현장에서 가장 이상적으로 적용될 수 있도록 최적화시키는 과정을 포함하며 여기에서는 액상포말의 원 위치 생산 (*in situ* generation) 방법 및 미생물과의 효과적인 혼합, 오염원에 따른 적절한 분사방법 및 분사량, 시제품 제작을 통한 현장 적용 등이 주된 개발 목표임.

사. 본 연구는 초반에 악취분해미생물과 안정적인 액상포말 제조기술에 관한 연구를 중점적으로 먼저 수행할 계획이며 이를 바탕으로 시제품 또는 유사한 단계의 액상포말제조기를 개발하여 후반에는 현장 적용을 통한 필드실험이 가능하도록 진행하려고 함.

아. 최종적으로 성능 검사를 통하여 악취 제어 효과를 확인하고 특허 혹은 실용신안 출원을 목표로 함. 또한, 연구 결과물의 상품화 가능성에 대해서도 모색할 예정임.

2. 연구개발의 범위

가. 포말 제조 및 포말안정성 향상 실험

- 최적의 액상포말을 만들기 위해서 여러 가지의 첨가제를 사용하여 50% 배수시간, 포말지속시간, 팽창비, 밀도를 측정 한다.

나. 악취분해미생물의 배양

- 돈사에서 나오는 악취물질을 분해하는 미생물을 선택적으로 배양하기 위해서 악취분해미생물 연속배양장치를 만들어 장시간 운전하여 최적의 미생물을 배양한다.

다. 포말에서의 미생물 안정성 실험

- 미생물과 포말 상호간의 영향을 알아보기 위해 악취분해미생물의 포말안정성에 대한 영향, 포말 발생용액에서의 악취분해미생물의 생존성, 포말생성과정중의 악취분해미생물의 생존성에 대해 살펴본다.

라. 포말 및 악취분해미생물의 악취분해 실험

- 포말의 악취물질 차단 효과를 알아보고 악취분해미생물의 악취제어효과를 측정해 본 후 액상포말-미생물담체의 악취 제어 정도를 알아본다.

마. 악취제어와 관련된 첨가물질을 사용한 암모니아 제어효과 실험

- 여러 가지의 악취제어 물질을 액상포말과 액상포말-미생물담체에 첨가하여 악취제어 효과에 대해 알아본다.

바. 이동성 현장적용시스템의 설계 및 제작

- 실제 현장에서 액상포말담체를 생성하여 적용 시킬 수 있도록 하기 위하여 필요한 사항들과 용량을 고려하여 현장적용시스템을 설계하고 실제 제작한다. 제작한 기기를 시험 가동 시켜 개선점을 찾아내어 설계를 보완한다.

사. 현장 적용성 검증

- 제작한 현장적용시스템을 이용하여 실제 액상포말 담체를 생성, 포말의 특성을 관찰하고 안정성을 확인한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내외 관련 기술의 현황 및 전망

1. 국내외 관련기술의 현황과 문제점

- 가. 일반적으로 악취처리는 환경부에 의해 대기오염물질 배출시설로 지정된 업체에서 발생하는 물질들을 대기환경보전법에 따라서 제어하는 것에 그 주안점이 맞춰져 있으며 이러한 목적을 달성하기 위하여 흡착제, 화학적 처리, 바이오필터 등과 같은 방법이 주로 사용되고 있음.
- 나. 축산관련시설은 생활악취시설로 분류되어 관리되고 있는데 그 예로는 도축장, 축산폐수, 분뇨 및 오수 처리시설 등이 있으며 이러한 시설의 악취제어 역시 대기오염물질 배출시설의 처리에 사용되는 방법을 응용하는 수준 (예, 바이오필터를 이용하여 악취물질의 종류에 따라서 처리매질을 바꾸어 주는 등)에서 이루어지고 있음.
- 다. 이러한 기존의 처리법은 대부분이 공정 또는 설치형 시스템의 개념이므로 축산관련시설 전반에 걸쳐있는 다양한 악취유발시설이나 국지적인 고농도 악취원에 대한 효과적이고 신속한 제어에는 한계가 있음.
- 라. 특히, 악취성분의 저농도 채집 및 분석에 상당한 장비와 기술이 요구되며 분석결과에 의한 역치 (threshold)보다는 민원인의 감각적 판단에 따른 결정에 의해 악취제어의 실효성 또는 성패가 좌우되는 경우가 많으므로 공기중으로 확산이 일어나기 전에 제어를 하는 것이 바람직하다고 판단됨.
- 마. 따라서 본 연구진은, 확산 후 바이오필터 등을 이용하여 제어를 하는 기존의 방법을 탈피하여, 악취물질의 확산이 일어나기 전에 악취원을 직접적으로 제어할 수 있는 간편하고 신속한 새로운 기술을 개발하고자 본 연구를 제안함.

2. 앞으로의 전망

갈수록 위축되어 가는 우리나라 축산산업의 현실과 경제적 발전에 따른 삶의 질 향상, 그리고 환경오염에 대한 관심이 증가되어 가는 사회적 추세를 고려해 볼 때 축산관련 시설에서 유래하는 악취제어에 대한 사회적 요구는 갈수록 증가할 것으로 예상되므로 이에 대비한 혁신적인 기술개발이 절실히 요구됨.

3. 기술도입의 타당성

본 연구진이 개발을 시도하는 액상포말-미생물담체 (aqueous foam-microbial medium)는 공장시설 등의 고압분사형 세척기술이나 석유자원의 회수율 향상 등에 그 원리의 일부 (aqueous foam technology)가 이용되고 있지만 액상포말에 생물학적 기능을 도입한 기술은 아직 존재하지 않으므로 기술도입 자체가 불가능한 완전한 새로운 기술임.

제 3 장 연구개발 내용 및 결과

제 1 절 연구개발의 단계별 수행 내용 요약

본 연구의 목적이 악취원에 직접 적용 시킬 수 있는 현장적용 악취제어 시스템의 개발인 만큼, 악취의 발산을 효과적으로 차단하고 분해 할 수 있는 매질을 개발하는 한편 이를 현장에 효율적으로 적용 할 수 있는 방안까지 모색하고자 하는 것이 본 연구의 핵심 전략이다. 본 연구에서는 악취 확산 차단의 매질로써 액상포말을 선정하였고 따라서 본 연구의 내용은 다음의 두 분야로 크게 나누어 볼 수 있다. 악취분해 미생물을 함유한 포말형 액상담체의 개발과 이를 이용한 이동식 현장적용시스템의 개발이 그것이다.

연구개발의 주요 과정은 다음과 같다. 먼저 주요 악취발생물질을 분해 할 수 있는 미생물들을 선별하여 배양하는 한편, 악취의 확산을 효과적으로 막고 미생물의 성장 배지로써도 이용이 가능한 액상포말의 구성성분을 결정하였다. 그리하여 미생물의 포말 내 생존 여부와 악취 물질 분해 여부를 확인하며 액상포말-미생물 담체의 효과를 검증 하였다. 이동식 현장적용시스템은 액상포말-미생물 담체를 현장에 효율적으로 적용 시킬 수 있도록 제작하는 것이 목적이었으며, 포말이 안정적으로 형성되는지 여부와, 사용의 편리성과 안전성을 향상시키기 위한 실험을 진행하였다.

아래 표는 본 연구에서 실시한 수행과제와 그 세부 연구 사항들을 단계별로 정리한 것이다.

연구개발 과제	세부 연구 사항
1. 축산관련시설의 주요 악취성분에 대한 조사	- 문헌자료 수집

<p>2. 악취분해 미생물군의 분리 및 배양</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 악취분해 미생물 분리 및 동정 (consortium) - 이미 알려진 미생물 종 확보 (축산악취 분해에 효과적인 컨소시움 구성) - 컨소시움 구성 미생물간의 상호적합성 조사
<p>3. 악취분해 미생물에 관한 연구</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 선발된 미생물들에 의한 악취저감효과 조사 - 연속식 배양기의 운전 상태 모니터링
<p>4. 실험실용 포말발생기 제작</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 포말구성성분 함유 수용액, 압축공기, 유리컬럼 등을 이용
<p>5. 흡착성 액상포말 구성성분 결정</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 안정적이며 미생물의 영양분으로도 이용될 수 있는 포말 구성성분 조사 - 포말의 특성에 관한 조사 (weight-volume ratio, flow properties, controlled release medium, expansion gas 등)
<p>6. 액상포말에 의한 악취제어 효과 조사</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 액상포말에 의한 악취 제어 효과 조사
<p>7. 포말에서의 미생물 안정성 연구</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 미생물이 액상포말 안정성에 미치는 영향 조사 - 액상포말과 미생물들간의 적합성 조사 - 포말생산, 분사 과정 중 미생물의 생존성 조사
<p>8. 액상포말-미생물 담체의 성능 조사</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 흡착성 액상포말-미생물담체의 악취물질 분해, 제어능력 조사
<p>9. 악취제어 첨가물질 주입에 의한 제어효과 조사</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ammonia 등을 제어하는 것으로 알려진 첨가물질을 액상포말담체에 주입하여 악취제어능 검사 실시

<p>10. 원 위치 생산 현장적용시스템 설계</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 현장에서 액상포말의 생산 및 분사가 가능한 이동식 시스템 개발 (man-portable equipment, fixed mount unit 등) - 기기 시제품의 설계 및 제작 - 제작한 현장적용시스템을 시운전 - 발견된 문제점들을 수정 및 보완하여 완성도가 높은 이동식 포말제어시스템 구축
<p>11. 현장적용 가능성 검증</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 제작한 현장적용시스템을 이용하여 발생 시킨 포말담체의 특성을 조사하여 현장적용 가능성을 검증

제 2 절 연구 수행 방법

1. 축산관련시설의 주요 악취성분에 대한 조사

우리나라의 대기환경보전법상 악취는 황화수소, 메르캅탄, 아민류, 기타 자극성 있는 기체 물질이 사람의 후각을 자극하여 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새로 정의되어 있다. 냄새를 유발하는 물질은 40만 여종 이상 알려져 있으며, 이 중 악취물질은 질소 또는 황화합물을 포함하고 있고, 일반적으로 다중의 고리모양 화합물 형태를 가지면서 분자량에 따라서 냄새의 특징이 달라진다. 이러한 악취의 발생은 악취물질, 기온, 습도 등의 다양한 조건에 따라 달라지며, 따라서 축산관련시설에서 주로 발생하는 악취 성분을 조사해 볼 필요가 있다.

본 연구에서는 축산관련시설에 대한 대기분석 자료들과 악취에 관련된 논문과 보고서들을 수집하여 여러 악취 물질들 중 가장 높은 비중을 차지하고 있는 물질들을 선별하여 이들에 대한 집중적인 연구를 실시하였다.

2. 악취 분해 미생물군의 분리 및 배양

본 연구의 초기에는 잘 알려진 악취물질인, 암모니아, 황화수소, 휘발성 지방산, 아민류 등을 분해하는 미생물을 각각 두 종씩 구입, 배양하여 실험에 이용하였다. 그러나 대상 미생물들의 성장조건 (온도, 영양요구성 등)에 큰 차이가 있어 이들을 동시에 배양할 수 있는 배지성분과 배양조건을 도출하는 것은 거의 불가능하였다. 그 대안으로서 활성슬러지를 이용하는 방법을 고안하였으며 이를 위하여 연속식 미생물배양장치 (chemostat)를 제작하였다.

구성은 폭기조 (지름 20 cm, 높이 20 cm), 배양조 (지름 14 cm, 높이 60 cm), 분뇨통 (지름 26 cm, 높이 25cm), 모터, 기포발생기, 유체펌프, 공기펌프로 이루어져 있다 (Fig. 1). 악취원으로서 돈분뇨를 이용하였으며 이로부터 공기 중으로 휘발한 악취물질은 활성슬러지가 있는 미생물 배양조로 유입된 후 영양분으로 사용되어 미생물의 성장에 이용되도록 하였다. 대부분의 악취분해미생물이 호기성임을 감안하여 폭기조를 설치하였으며 폭기가 된 활성슬러지는 미생물배양조로 유입되

어 수두차에 의해서 다시 폭기조로 유입되는 순환과정을 거치도록 설계되었다. 미생물의 안정성을 알아보는 척도로서 미생물배양조에서 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solids), pH를 측정 하였다.

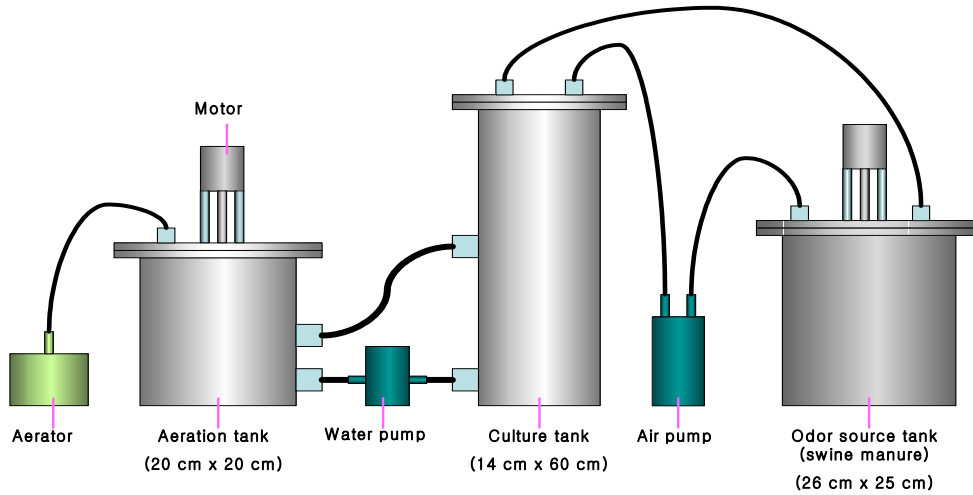


Fig. 1. 연속식 악취분해미생물 배양장치

3. 악취분해 미생물에 관한 연구

연속식 미생물 배양장치를 사용하여 악취분해 미생물을 배양하였다. 악취공급원으로서 돈사에서 수거한 분뇨를 사용하여 분뇨에서 나오는 휘발 성분인 VFA (Volatile Fatty Acid)를 영양분으로 하여 악취분해에 관여하는 미생물들을 연속식 배양기를 제작하여 지속적으로 배양하였다. 또한 악취분해 미생물의 암모니아와 황화수소의 제어 여부를 알아보기 위해서 배양조에서 일정 기간마다 각각의 농도를 측정하였으며 분뇨의 교체시기를 알아보하고자 분뇨통의 VFA 농도를 측정하였다. 악취분해 미생물의 일정한 개체군 유지를 위해 pH와 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid)를 측정하며 모니터링 하였다.

4. 실험실용 포말발생기의 제작

포말발생실험을 위해 개발한 실험실용 포말장치는 크게 공기 콤프레서, 유리구슬 (지름 1 cm)로 충전된 칼럼 (지름 10 cm, 높이 30 cm), 혼합기 (가로 20 cm, 세로 15 cm, 높이 15 cm), 포말포집조 (지름 40 cm, 높이 20 cm)로 구성되어 있다 (Fig. 2). 혼합기에 미생물과 포말형성수용액을 넣고 밸브를 열면 혼합액이 칼럼에 주입되는데 이때 공기 콤프레서를 가동시키면 액상포말이 형성되며 포집조로 들어가게 된다. 또한 포말포집조에서 붓겨된 거품의 배수액은 100 mL 눈금실린더를 이용하여 그 양이 측정되었다. 실험에 사용된 공기 콤프레서의 압력은 30 psi, 유속은 12.7 cm/sec이었다.

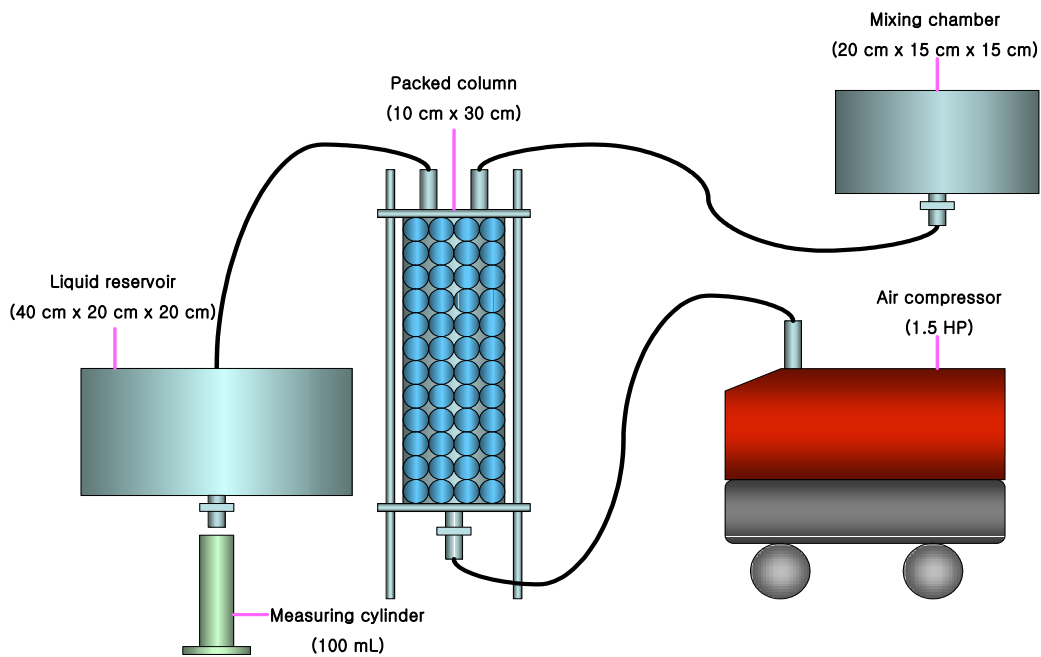


Fig. 2. 실험실용 포말발생기의 개념도

5. 흡착성 액상포말의 구성성분 결정

악취제어에 가장 이상적인 액상포말 구성성분은 다음의 과정을 통하여 결정하였으며 이에 관한 구체적인 내용은 본 절의 '3. 연구수행 내용 및 결과'에 자세히 기술되어 있다. 아래 ①~④과정을 거쳐 결정된 최종 액상포말 구성성분으로 제조한 액상포말을 이용하여 가축분뇨의 악취제어에 관한 기초적인 실험을 수행하였다.

- ① 문헌조사를 통하여 액상포말 형성에 적합한 물질들의 후보군 선택
- ② 실험실용 포말발생기 개발
- ③ 선택된 성분들을 적절한 배합비로 혼합하여 액상포말 제조
- ④ 발생된 액상포말의 특성 (50% 배수시간, 포말지속시간, 밀도, 부피 등) 조사

안정적인 포말을 형성하는 성분을 결정하기 위해 포말 안정성에 대한 주요 척도라고 볼 수 있는 50% drainage time (50% 환원시간), foam lifetime (포말지속시간), 밀도, 부피를 측정하였다. 50% drainage time은 포말이 깨져서 포말 중량의 50%가 원래의 포말 수용액으로 되돌아가는 데 걸리는 시간을 의미하고 foam lifetime은 포말의 형태가 남아있는 최대한의 시간을 나타낸다.

포말을 형성시키기 위해 사용된 원료로는 시중에 가장 안정적으로 공급되고 부피가 큰 포말을 형성하는 Keratin 가수분해제를 사용하였으며, 이는 동물의 뿔, 발톱 등에서 추출된 단백질을 알칼리로 가수분해한 물질이다. Keratin은 시스틴이라는 아미노산을 다량 함유하고 있어서 peptide 결합에 disulfide 결합이 망상으로 이어진 선상구조를 가지고 있다. 이러한 단백질은 공기와 뒤섞이면서 분자의 일부에서 변성이 일어나게 되고 서로 얽혀서 막을 만든다. 이렇게 발생한 막은 깨지기 힘들고 막사이로의 유체의 흐름이 방해받기 때문에 안정성이 있는 포말이 되는 것이다. 이러한 포말의 안정성을 더욱 높이기 위해 2가의 금속염을 첨가하였는데, 금속염이 막 표면에서 공기와 접촉하여 3가의 금속이온으로 산화 되어 표면에 침전하게 되면 고체화된 막이 만들어져 막 내부 유체의 흐름 저해로 인하여 포말을 더욱 안정화시키기 때문이다. 안정성과 더불어 중요한 것이 팽창률인데 2가의 금속염(FeCl_2 , FeSO_4)들은 포말의 부피를 증가시키는 역할도 한다. Glycol류의 물질 역시 포말의 팽창률을 현저하게 증가시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있어 본 연

구에서는 Ethylene glycol 또한 사용하였다. 이 물질은 부동제의 역할도 하므로 본 연구결과가 제품으로 생산될 경우 겨울철에도 안정적으로 사용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. 생성된 포말의 안정성을 증대시키기 위한 물질로서 계면활성제를 첨가하였는데 이는 포말의 표면장력을 감소시켜 침투성 (wetting)을 높여주고 쉽게 포말을 형성시키며 포말 안의 수분이 중력에 의해 아래로 이동하는 속도를 감소시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 환경적 요인을 고려하여 화학적 합성물질이 아닌 천연계면활성제인 Saponin을 사용하였다.

조제된 용액들은 포말발생 장치를 거쳐 2,500 mL 포집조에 포말로 뿌려졌으며 포말로부터 배수된 액체는 포집조 중간의 작은 구멍을 통해 100 mL의 눈금 실린더에 수집되었다. 실험은 온도 25°C, 습도 50%의 조건하에서 이루어졌으며, 각 포말용액에 대한 포말의 안정성을 보기 위해 액상포말용액 100 mL로부터 생성된 포말의 50% 배수시간, 포말지속시간, 팽창비, 밀도를 측정하였다.

6. 액상포말에 의한 악취제어 효과 조사

생성된 액상포말은 악취의 발산을 직접 제어하는 효과를 가지고 있을 것으로 예상되므로 그 물리적 차단효과를 알아보기 위하여 액상포말 살포 전후의 악취농도 변화를 시간별로 측정하였다.

악취물질의 공기 중 농도를 측정하기 위한 장치로, 샘플링을 할 수 있는 밸브를 바닥에서부터 30 cm 높이에 양쪽으로 각각 부착한 분뇨통 (지름 30 cm, 높이 40 cm)을 제작하였으며, 여기에 돈분뇨 3,500 mL를 주입한 후, 포말형성수용액 약 152 mL를 사용하여 돈분뇨 위에도 포말을 발생 시켰다. 이때, 발생시킨 포말은 이론적으로 약 4,800 mL이다.

또한, 사용된 포말의 양에 따라 악취 제어 효과에 차이가 있을 것이라는 판단 때문에 포말의 높이에 따른 악취제어 실험도 함께 수행하였다. 사용된 포말의 양은 50 ~ 600 mL 이었으며, 사용량에 따른 포말의 높이는 2.5 ~ 30 cm 이었다.

7. 포말에서의 미생물 안정성 연구

본 연구에 사용되는 포말 형성 혼합액이 약취분해 미생물의 영양분으로 사용되어 미생물활성을 유지시켜야 하므로 이를 알아보기 위해 포말구성성분으로 고체배지를 만들어 미생물 생장으로 확인하는 실험을 실시하였다.

미생물과 포말의 상호간의 영향을 알아보기 위해 약취분해미생물을 포말형성 수용액에 넣고 포말을 발생시키면 50% 배수시간과 팽창비에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보는 약취분해미생물의 포말안정성에 대한 영향과 포말발생 수용액에 약취분해 미생물을 혼합시켰을 때 분해미생물이 생존가능한 지를 살펴보는 포말발생용액에서의 분해미생물의 생존성 여부 실험을 수행 하였다. 또한 포말의 생성시 분해 약취분해 미생물이 압력에 의한 생존 여부를 보기 위해서 포말생성과정중의 분해미생물의 생존성에 대해 연구해 보았다.

가. 포말형성 수용액에서의 미생물 성장 확인

본 연구에 사용되는 포말 형성 혼합액이 약취분해 미생물의 영양분으로 사용되어 미생물활성을 유지시켜야 하므로 이를 알아보기 위해 포말구성성분으로 고체배지를 만들어 미생물 성장을 확인하는 실험을 하였다. 본 실험의 또 한 가지 목적은 Keratin 가수분해 원료물질에 들어있는 Paraben이라는 방부제의 미생물 성장억제 여부를 알아보기 위함이었다. 포말 형성 혼합액에 미생물의 생장에 필요한 무기염류와 성장을 촉진하기 위한 미세영양분 (1/10 strength TSB)을 첨가하고 pH를 중성으로 조정한 고체배지에 약취분해미생물로 알려진 *Paracoccus* sp., *Micrococcus* sp., *Alcaligenes* sp. 등 세 종류의 순수 분리된 미생물을 접종하여 30°C에서 배양하면서 성장여부를 관찰하였다.

나. 약취분해미생물의 포말안정성에 있어서의 영향

연속식 미생물 배양장치에서 배양되고 있는 약취분해미생물 200 mL를 6,000 × g, 온도 10°C에서 30분 동안 원심분리한 후에 20 mL Phosphate buffer solution에 넣었다 (Ripley et al., 2000). 이것을 500 mL의 눈금실린더에 80 mL의 포말형

성수용액과 함께 넣고 섞었다. 또한 80 mL의 포말형성수용액에 미생물이 존재하지 않는 Phosphate buffer solution 20 mL를 넣은 후 각각의 용액을 포말발생장치를 이용하여 포집조에 포말을 형성시키고 생성된 포말의 부피와 시간에 따른 배수량을 측정하여 각각을 비교하였다.

다. 포말형성수용액에서의 악취분해미생물의 생존성

악취분해미생물 200 mL를 $6,000 \times g$, 온도 10°C 에서 30분 동안 원심분리한 다음 20 mL Phosphate buffer solution에 넣었다. 이것을 500 mL의 유리병에 80 mL의 포말형성수용액과 함께 섞은 후 30°C Shaking incubator에 48시간 동안 배양하였다. 이것을 24시간마다 Sampling하여 Nutrient agar배지에 배양하고 표준평판계산법을 사용하여 0, 24, 48시간에서의 미생물 수를 측정하였다

라. 포말 생성 과정 중 악취분해미생물의 생존성

악취분해미생물균 200 mL를 $6,000 \times g$, 10°C 에서 30분 동안 원심분리한 후에 20 mL Phosphate buffer solution에 집어넣었다. 이것을 포말발생장치를 이용하여 포집조에 포말을 형성시키고 포말 속에 있는 미생물의 수와 배수되어 나온 용액 속에 들어있는 미생물 수를 표준평판계산법을 사용하여 포말 생성과정전의 미생물 수와 비교하였다.

8. 액상포말-미생물 담체의 성능 조사

포말의 악취물질 차단 효과를 알아보고 분해미생물의 악취제어효과를 측정해 본 후 액상포말-미생물담체의 악취제어 실험을 하여 제어 정도를 알아보았다.

악취원인물질의 분해정도를 알아보기 위해서 분뇨통 (40 cm × 30 cm) 3개를 만들었다. 또한 높이 30 cm되는 지점에는 샘플링을 위해 양쪽에 밸프를 장치했다. 각 분뇨통에 분뇨를 3,500 mL씩 주입하고 각각의 분뇨통에 분뇨, 분뇨위에 액상포말, 분뇨위에 액상포말-미생물담체를 분사하고 뚜껑을 닫았다 (Fig. 3).

각각 50,000 mL의 분뇨통에 포말을 발생시키기 위해 사용된 용액의 부피는 100

mL이고 접종된 미생물의 개체수는 10^7 CFU/mL이다. 기상에서의 시간에 따른 암모니아와 황화수소의 농도 변화는 다음과 같은 방법으로 측정되었다. 암모니아의 경우, Denuder방법으로 샘플링을 한 후 자동분석기기를 사용하여 automated phenate법으로 측정하였고 (Skalar 社, Netherland) 황화수소는 검지관 (Gas detecting tube, Gastec 社, Japan)으로 측정되었다.

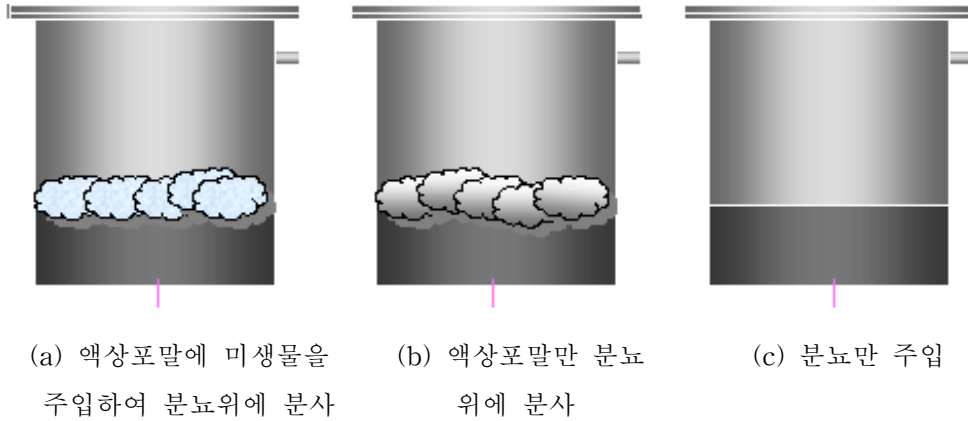


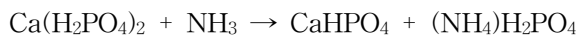
Fig. 3. 액상포말-미생물담체에 의한 악취 제어

9. 악취제어 첨가물질의 주입에 의한 악취제어 효과 조사

Ammonia binding 물질로 알려진 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, Yucca extracts를 액상포말과 액상포말-미생물담체에 첨가하여 악취제어 효과에 대해 알아보고 비교해 보았다.

가. $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 의 첨가

$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 의 암모니아와의 반응식은 다음과 같으며 이와 같이 암모니아의 침전을 통하여 암모니아 방출을 억제하게 된다.



또한 포말을 산성화를 시켜서 pH를 낮추는 역할을 한다. $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 는 이렇게

암모니아와 결합하거나 pH를 낮춰서 암모니아 발산을 억제하는 효과를 통해서 암모니아를 저감시키게 된다. 이러한 암모니아 제어효과를 보이는 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 를 액상포말에 0.1~1.0%를 첨가하여 실험해보았다.

나. Yucca extracts의 첨가

Yucca extracts는 *Yucca shidigera*의 식물에서 추출된 물질로서 암모니아를 결합하거나 urease의 활동을 억제하는 능력이 있는 것으로 알려져 있으며 steroidal glycoside인 sarsaponin을 포함하고 있다. Yucca 추출물을 액상포말 속에 0.1~1.0%를 섞은 후 분뇨위에 뿌려 농도별 암모니아 저감 효과를 알아보았다.

10. 원위치 생산 현장적용시스템의 설계

본 연구에서 개발된 액상포말-미생물담체의 현장 적용성을 높이기 위하여 실험실용 포말발생장치에 근거한 이동식 포말발생기 시제품을 제작 하였다. 포말발생기는 고압에 견딜 수 있는 재질로 만들어야 하며 밀폐가 확실해야 하고 현장에서 비전문가들에 의해 사용되는 만큼 간단하고 조작하기 쉬워야 한다. 이러한 기본적 고려 사항들을 바탕으로 이동식 포말발생장치를 설계 및 제작하였으며, 이 장치를 직접 가동하며 미비한 부분을 점차 개선시켜 나가면서 최종 시제품을 완성하였다.

11. 현장적용가능성 검증

최종 시제품으로 형성한 포말의 안정성을 측정하기 위하여 50% 배수시간, 포말 지속시간, 팽창비를 조사 하였으며 이를 실험실 포말발생기에서 생성된 포말과 비교하여 현장적용가능성을 검증하였다.

제 3 절 연구 수행 내용 및 결과

1. 축산관련시설의 주요 악취성분에 대한 조사

문헌조사에 따른 결과, 축산시설 내에서 발생하는 악취의 근본 원인은 가축들의 사료와 배설물로써, 사료의 질과 가축의 종류에 따라 발생하는 악취물질이 조금씩 차이가 나는 것으로 알려져 있다. 하지만 무엇보다 가장 큰 악취발생원은 가축 분뇨의 부패로써, 자연환경과 계절에 큰 영향을 받는다고 한다. 축산시설 악취를 전반적으로 조사를 하면, 암모니아, 아민, 황화수소, 메르캅탄, 페놀, 휘발성 지방산 등의 수용성 물질과 인돌, 아황산가스, 알데히드, 케톤, 에스테르류 등의 지용성 물질들이 주로 검출된다. 이중 암모니아와 황화수소는 다른 물질들에 비해 훨씬 높은 농도로 존재하고 있음이 여러 조사에서 확인 되었으며 이에 따라 본 연구는 암모니아와 황화수소를 가축 분뇨 악취를 대표하는 척도로써 고려하고 연구를 수행하였다.

2. 악취 분해 미생물군의 분리 및 배양

본 연구의 초기에는 네 가지 악취물질 (암모니아, 황화수소, 휘발성 지방산, 아민류)을 분해하는 미생물을 각각 두 종씩 구입, 배양하여 실험에 이용하였다. 그러나 대상 미생물들의 성장조건 (온도, 영양요구성 등)에 큰 차이가 있어 이들을 동시에 배양할 수 있는 배지성분과 배양조건을 도출하는 것은 거의 불가능하였다. 그 대안으로서 활성슬러지를 이용하는 방법을 고안하였으며 또한 악취분해 미생물의 안정적인 공급을 위하여 연속식 미생물배양장치 (chemostat)를 제작하였다.

Chemostat의 구성은 폭기조, 반응조, 분뇨통, 모터, 기포발생기, 유체펌프, 공기 펌프로 이루어져있다 (Fig. 4). 분뇨통에서 공기 증으로 휘발한 악취물질은 활성슬러지가 있는 미생물배양조로 유입되어 미생물의 성장에 필요한 영양분으로 이용된다. 대부분의 악취분해 미생물이 호기성임을 감안하여 폭기조를 설치하였으며 폭기가 된 활성슬러지는 다시 미생물배양조로 유입되고 수두차에 의해서 다시 폭기조로 유입되는 순환과정을 거치도록 Chemostat를 설계하였다.



- | |
|-----------|
| 1.분뇨통 |
| 2.미생물 배양조 |
| 3.폭기조 |
| 4.교반모터 |
| 5.Aerator |
| 6.유체펌프 |
| 7.공기펌프 |

Fig. 4. 악취분해미생물 공급을 위한 연속식 배양장치

활성슬러지에는 많은 종류의 미생물들이 존재하며 그 중에는 악취물질을 분해하는 미생물종들도 포함되어 있는 것으로 알려져 있다. Chemostat는 악취물질을 영양분으로 하는 연속식 배양을 통하여 생리적으로 항상 일정한 상태에 있는 미생물을 공급받을 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 악취공급원으로서 돈사에서 수거한 분뇨를 사용하였으며 그 분뇨에서 휘발되어 나오는 성분 (주로 휘발성 지방산) 들을 영양분으로 하여 악취분해에 관여하는 미생물들을 선택적으로 그리고 지속적으로 배양하였다.

악취분해 미생물의 생리적 상태도 중요하지만 균일한 수의 미생물을 지속적으로 공급할 수 있어야 하므로 그 척도로서 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid) 를 측정하여 모니터링을 하였다. Fig. 5는 연속식 미생물배양조에 있는 활성슬러지의 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid) 변화를 측정한 결과이다. 그래프에서 보는 바와 같이 하수처리장에서 활성슬러지 샘플을 채취하여 배양한 초기에는 MLSS 수치의 변화가 심하였으나 배양 20일 이후부터는 MLSS 2,200 수준으로 일

정하게 유지가 되었다. 배양 40일 이후 MLSS의 하락은 기계장치의 결함으로 Chemostat 운전이 중지되었기 때문이며 재운전을 시작한 50일 이후부터는 MLSS 수치가 다시 2,000 정도로 일정하게 유지되고 있으므로 안정된 미생물 공급을 위한 Chemostat 운전은 성공적으로 판단된다.

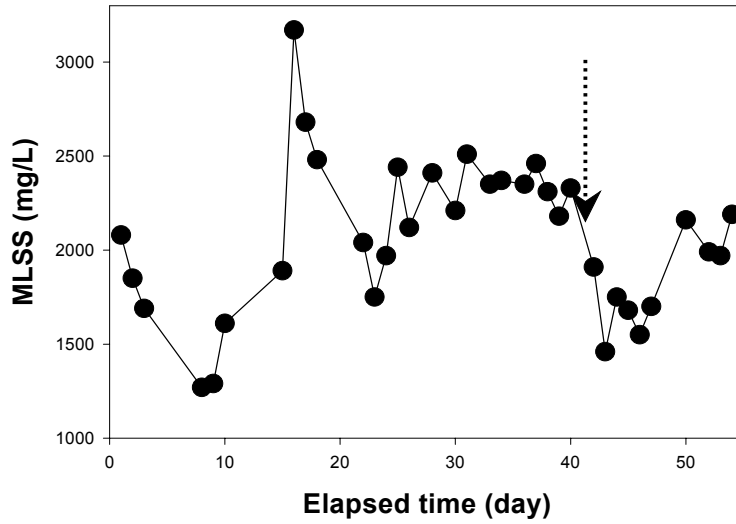


Fig. 5. 연속식 미생물배양조의 MLSS 농도 변화

3. 약취분해 미생물에 관한 연구

미생물의 안정적인 공급을 위해 제작된 연속식 미생물 배양기는 다음과 같은 실험으로 미생물의 개체군의 지속성을 알아보았다. 분뇨로부터 계속 폭기되는 암모니아에 의한 배양기내의 pH변화를 알아보고 미생물의 개체수가 유지되는 지를 알아보기 위해 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid)를 측정하였다. 또한 분뇨통과 배양조의 암모니아 및 황화수소 농도를 측정하여 미생물에 의한 분해를 알아보았으며 분뇨의 교체시기를 알아보기 위해 약취분해미생물의 탄소원으로 사용되는 VFA (Volatile Fatty Acid)의 저감을 측정하였다.

① pH

Fig. 6은 pH변화를 나타낸 그래프이다. pH는 NaHCO_3 를 사용하여 조절하였으며 pH 7사이에서 꾸준히 유지되고 있는 것을 볼 수 있다.

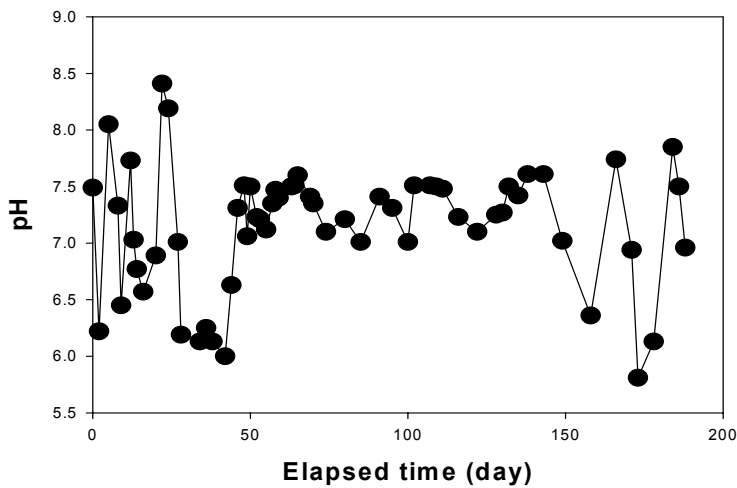


Fig. 6. 연속식 미생물 배양기의 시간 경과에 따른 pH 변화

② MLSS

Fig. 7은 약취분해 미생물의 개체군수를 나타낸 그래프로써 3000 mg/L 정도 유지되고 있음을 알 수 있으며 이것은 분뇨에 의한 영양분 공급이 제대로 이뤄지고 있음을 나타낸다.

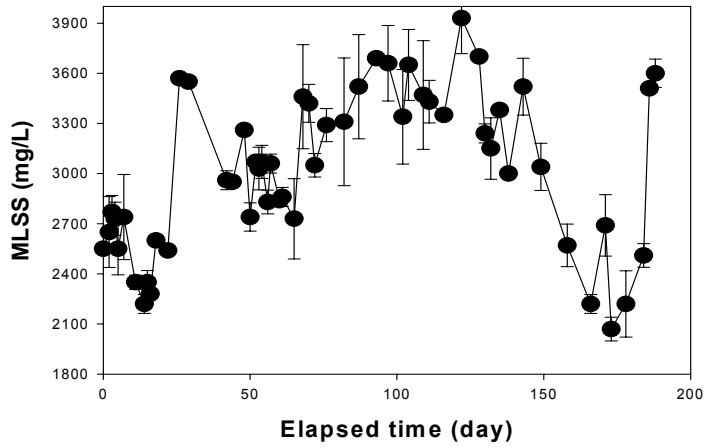


Fig. 7. 연속식 미생물 배양기의 시간 경과에 따른 MLSS변화

③ 암모니아 농도

분뇨통에서의 발생되는 암모니아와 배양조의 미생물을 통과한 후의 암모니아 농도를 비교해 보고자 분뇨통과 배양조의 암모니아 농도를 측정해 보았다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 경과 시간에 따라 암모니아 농도가 감소하는 것을 볼 수 있으며 초기농도의 80% 이상이 제어되는 것으로 나타났다.

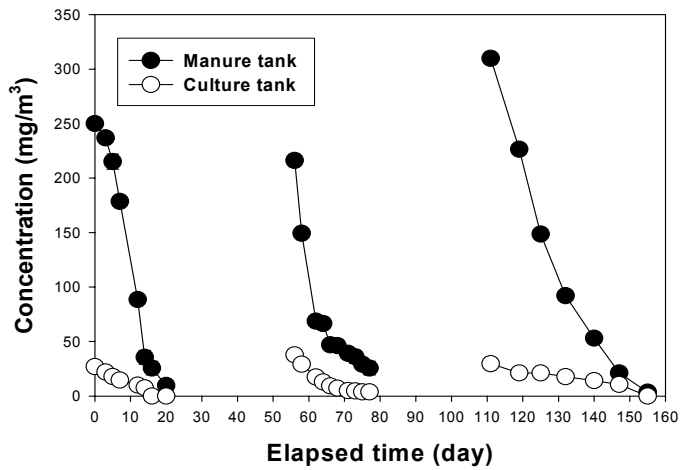


Fig. 8. 연속식 미생물 배양기에서의 분뇨통과 배양조의 시간 경과에 따른 암모니아 농도변화

④ 황화수소 농도

Fig. 9는 분뇨통과 배양조에서 시간에 따른 황화수소의 측정농도를 보여준다. 황화수소의 농도는 굉장히 다양하게 나타났다. 초기 농도가 4 ~ 23 mg/m³이었으며 40 ~ 50% 정도 제어되고 있음을 알 수 있다.

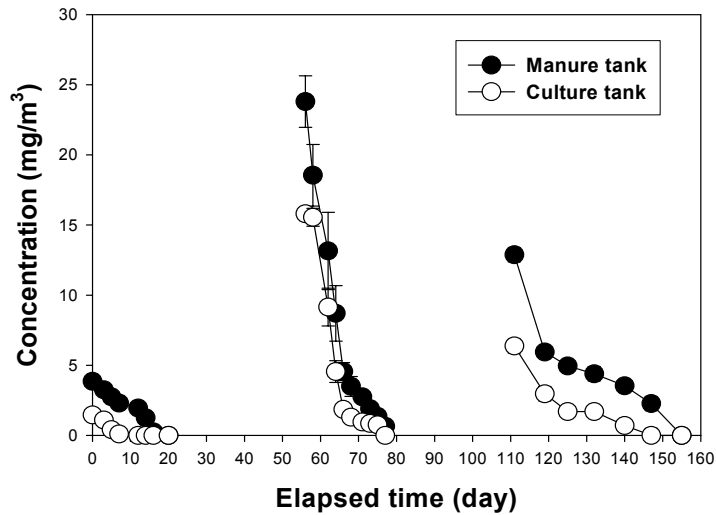


Fig. 9. 연속식 미생물 배양기에서의 분뇨통과 배양조의 시간 경과에 따른 황화수소 농도변화

⑤ Volatile Fatty Acid (VFA) 농도

악취분해미생물의 영양분으로 사용되는 분뇨의 교체시기를 알아보기 위해서 분뇨 속의 VFA 농도를 측정하였다. Fig. 10은 분뇨속의 VFA양의 변화를 나타낸 그래프이며 30 ~ 40일 간격으로 분뇨 속의 VFA가 소멸되는 것을 알 수 있었다. 40일부터 60일까지의 데이터는 측정기기에 문제가 있어서 측정하지 못했다.

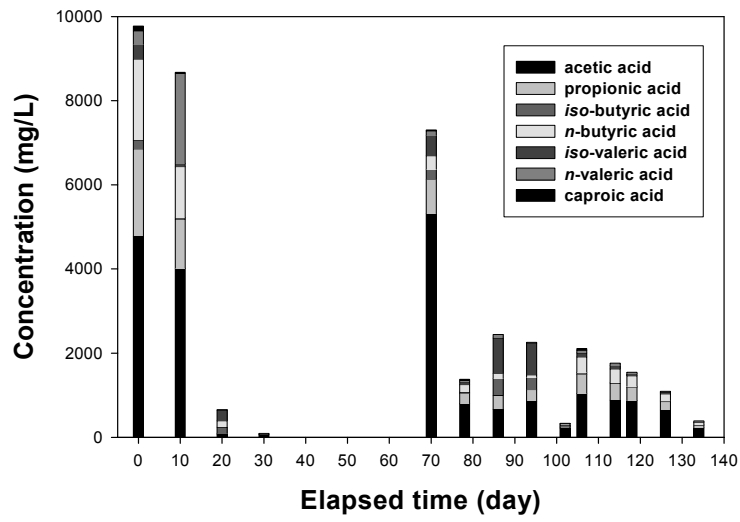


Fig. 10. 연속식 미생물 배양기에서의 시간 경과에 따른 VFA 농도변화

4. 실험실용 포말발생기의 제작

본 연구를 위하여 개발한 실험실용 포말발생장치 (Fig. 11)는 크게 air compressor, 유리구슬이 담긴 칼럼 (10 cm x 30 cm), 혼합기 (20 cm x 15 cm x 15 cm), 포말포집조 (40 cm x 20 cm x 20 cm)로 제작이 되었다. 혼합기에 미생물과 포말형성수용액을 넣고 밸브를 열면 혼합액이 칼럼에 주입되는데 이때 공기 콤프레서를 가동시키면 액상포말이 형성되며 포집조로 들어가게 된다. 또한 포말포집조에서 붕괴된 거품의 배수액은 100 mL 눈금실린더를 이용하여 그 양이 측정되었다. 실험에 사용된 air compressor 유속은 12.7 cm/sec이며, 컬럼은 직경 10 mm 크기의 유리구슬로 채워서 포말을 발생시켰다.



Fig. 11. 실험실용 액상포말발생 시스템

5. 흡착성 액상포말의 구성성분 결정

(1) 단백질 가수분해물질

액상포말의 가장 중요한 구성성분인 단백질로서 Collagen과 Keratin을 선택하였으며 그 가수분해물질을 이용하여 액상포말을 발생시키는 실험을 수행한 결과 포말의 물리적 성상이나 지속시간 등에서 Keratin 가수분해물이 더 우수한 것으로 나타났다. 따라서 향후 실험에서는 Keratin 가수분해물을 포말의 기본 구성성분으로 이용하였다.

Fig. 12는 Keratin을 사용하여 농도별 50% drainage time과 foam lifetime을 측정한 결과이고 Table. 1에는 Keratin 농도별 팽창비 (발생한 액상포말, mL/사용된 혼합액, mL)와 밀도를 나타내었다. Keratin 50%의 농도에서 발생된 포말은 연한 노란색을 띠었으며 50% drainage time은 40분, foam lifetime은 100분이었고 이때의 팽창비와 밀도는 각각 12, 1.096 g/cm³ 이었다.

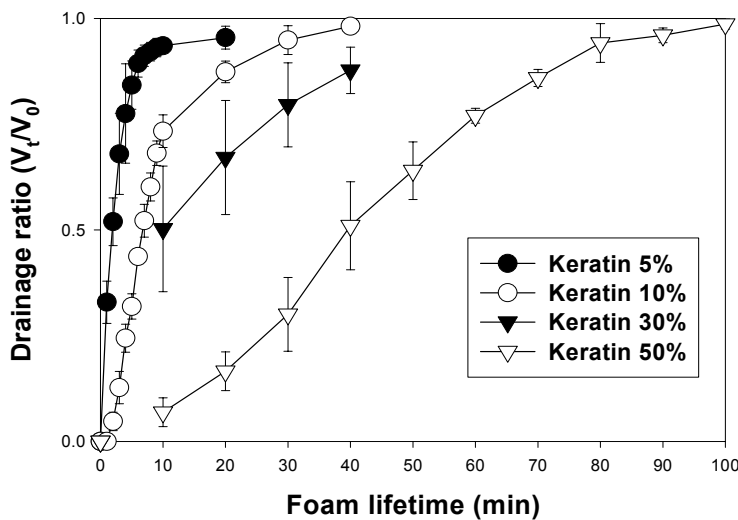


Fig. 12. Keratin 농도별 (5~50%) 50% drainage time과 foam lifetime 비교

Table 1. Keratin 농도별 (5~50%) 팽창비와 밀도

Keratin 농도 (%)	팽창비	밀도 (g/cm ³)
5	10.000	1.0230
10	11.111	1.0461
30	11.628	1.0627
50	12.069	1.0960

(2) 금속염 첨가효과

Keratin 50% 일 때 가장 우수한 포말을 형성하였으므로 같은 농도를 이용하여 포말안정제로 작용하는 여러 가지 금속염을 첨가하여 포말지속시간 및 팽창비를 알아보았다. Fig. 13은 50% Keratin에 FeCl₂, AlCl₃, MgCl₂를 첨가했을 때 50% drainage time과 foam lifetime을 비교한 그래프이다. 이중 FeCl₂가 50% drainage time 110분, foam lifetime 200분으로 가장 우수한 결과를 나타내었으며 이 때 포말은 약간의 회색빛을 띠면서 두꺼운 층을 형성하였다.

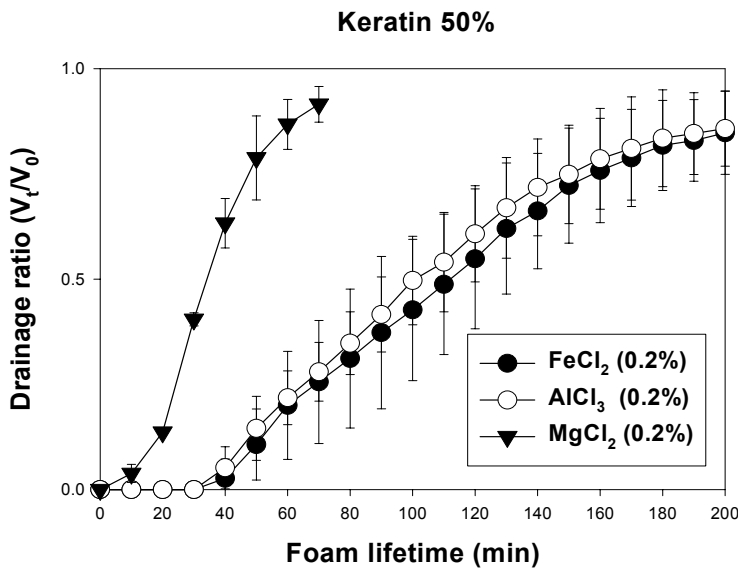


Fig. 13. Keratin 50%일 때 FeCl₂, AlCl₃, MgCl₂ 첨가에 따른 포말지속시간 비교

다음으로 FeCl_2 의 농도 (0.1 - 0.5%)에 따른 50% drainage time과 foam lifetime의 변화를 알아보는 실험을 수행하였다 (Fig. 14). 이때의 팽창비와 밀도는 Table 2에 나타나있다. FeCl_2 0.2%에서 50% drainage time 110분, foam lifetime 200분으로 나타났고 팽창비는 15.385로 가장 큰 값을 보였다. 그 이상의 농도에서는 포말이 쉽게 깨지고 지속시간도 짧았으며 팽창비가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, FeCl_2 의 함유량이 증가함에 따라 포말은 회색에서 연한 갈색을 띠는 것으로 관찰되었다.

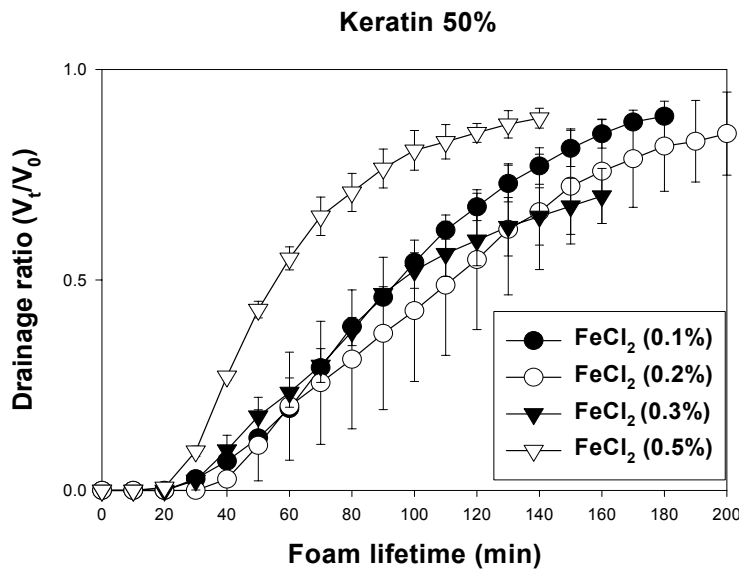


Fig. 14. Keratin 50%일 때 FeCl_2 첨가에 따른 포말지속시간 비교

Table 2. Keratin 50%와 FeCl_2 의 농도에 따른 팽창비와 밀도

FeCl_2 농도 (%)	팽창비	밀도 (g/cm^3)
0.1	13.061	1.0975
0.2	15.385	1.1001
0.3	14.500	1.1035
0.5	13.044	1.1063

(3) Ethylene Glycol 첨가효과

팽창률과 점성을 높이기 위해 Ethylene Glycol을 첨가하여 실험을 해보았다. Fig. 15는 Keratin 50%, FeCl₂ 0.2%일 때 Ethylene Glycol을 농도별로 첨가하여 포말형성 정도를 측정한 결과이다. 5% 이상의 Ethylene Glycol농도에서부터 50% drainage time, foam lifetime이 현격히 높아졌으며 Ethylene Glycol 20%에서 가장 높은 50% drainage time 140분, foam lifetime 240분을 나타냈다. Ethylene Glycol 10%에서도 50% drainage time 125분, foam lifetime 220분으로 20%인 경우와 크게 차이가 없었으며 특히, 팽창비에서는 14로 높게 나타났기 때문에 포말형성의 최적조건을 Ethylene Glycol 10%로 결정하였다. 생성된 포말은 Ethylene Glycol 농도가 증가할수록 회색빛을 띠었다.

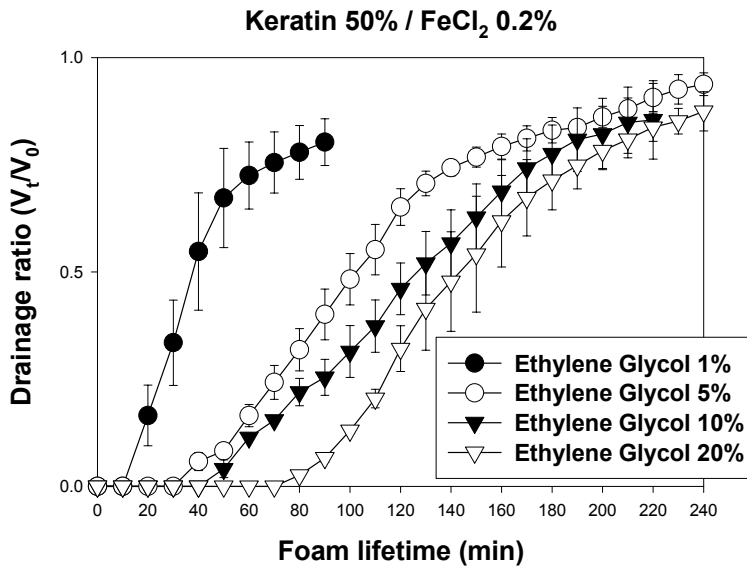


Fig. 15. Keratin 50%, FeCl₂ 0.2%일 때 Ethylene Glycol 농도별 포말지속시간 비교

Table 3. Keratin 50% / FeCl₂ 0.2%일 때 Ethylene Glycol 농도별 팽창비와 밀도

Ethylene Glycol 농도 (%)	팽창비	밀도 (g/cm ³)
1	16.071	1.1002
5	13.953	1.1007
10	14.000	1.1013
20	10.556	1.1023

(4) 계면활성제 첨가효과

생성된 포말계면의 표면장력을 감소시켜 팽창비를 증가시키기 위하여 계면활성제를 사용하였다. 일부 화학적으로 합성된 계면활성제는 미생물의 성장에 악영향을 미친다는 보고가 있으므로 본 연구에서는 미생물의 활성화에 영향이 없는 천연계면활성제인 Saponin을 사용하였다. Fig. 16은 Keratin 50%, FeCl₂ 0.2%, Ethylene Glycol 10%일 때 Saponin을 농도별로 첨가한 후 포말의 발생을 측정한 결과이다. Saponin 0.2%일 때 50% drainage time 190분, foam lifetime 420분으로 가장 우수한 포말을 형성하였지만 본 연구에서는 최적조건으로 팽창비를 고려하여 0.3%를 선택하였다 (Table 4). Saponin 0.5%에서는 팽창비는 가장 우수하였으나 포말지속시간이 가장 짧은 것으로 나타났다.

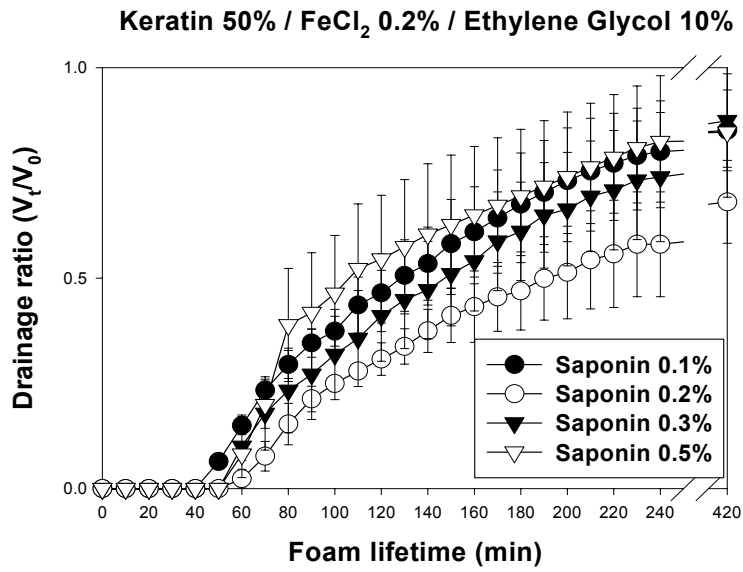


Fig. 16. Keratin 50%/FeCl₂ 0.2%/Ethylene Glycol 10%일 때 Saponin 농도별 포말지속시간 비교

Table 4. Keratin 50%/FeCl₂ 0.2%/Ethylene Glycol 10%일 때 Saponin농도별 팽창비와 밀도

Saponin 농도 (%)	팽창비	밀도 (g/cm ³)
0.1	22.500	1.1058
0.2	28.438	1.1064
0.3	34.884	1.1081
0.5	36.000	1.1101

(5) FeSO₄ 첨가효과

더욱 안정된 포말을 형성하기 위하여 또 다른 금속염인 FeSO₄을 첨가하였다. Fig. 17은 FeCl₂ 0.2%, Ethylene Glycol 10%, Saponin 0.3%, FeSO₄ 5%를 넣고 Keratin의 농도 (10, 30, 50%)에 따른 포말지속시간의 변화를 나타내었다. Table 5에서 알 수 있듯이 Keratin 50%일 때 가장 큰 팽창비를 나타내었지만 포말지속시간은 Keratin 30%일 때 50% drainage time 1,440분, foam lifetime 4,800분으로 Keratin 50%의 경우보다 거의 2배 이상의 높은 수치를 보였다.

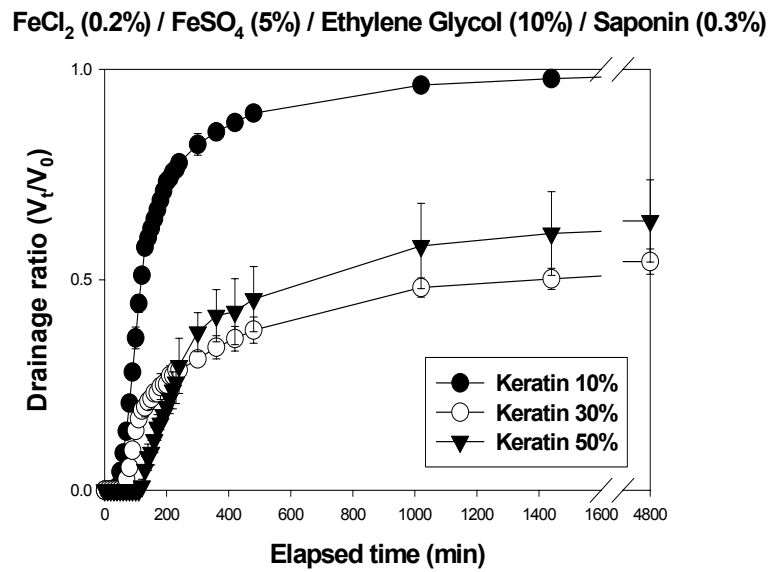


Fig. 17. FeCl₂ 0.2%/FeSO₄ 5%/Ethylene Glycol 10%/Saponin 0.3%일 때 Keratin 농도별 포말지속시간 비교

Table 5. FeCl₂ 0.2%/FeSO₄ 5%/Ethylene Glycol 10%/Saponin 0.3%일 때 Keratin 농도별 팽창비와 밀도

Keratin 농도 (%)	팽창비	밀도 (g/cm ³)
10	34.043	1.0691
30	35.000	1.1030
50	57.143	1.1308

이상에서 실험한 포말구성성분들의 배합조건에 따른 포말의 특성을 종합하면 Table. 6과 같으며 이를 바탕으로 Keratin 30%, FeCl₂ 0.2%, Ethylene Glycol 10%, Saponin 0.3%, FeSO₄ 5%를 최적 포말구성성분으로 결정하였다.

Table 6. 포말구성성분에 따른 포말특성 비교

Formula	50% drainage time (min)	Foam lifetime (min)	팽창비	밀도 (g/cm ³)
Keratin 30%	10	40	11.628	1.0627
Keratin 50%	40	100	12.069	1.0960
Keratin 50% FeCl ₂	110	200	15.385	1.1001
Keratin 50% FeCl ₂ 0.2% Ethylene Glycol 10%	130	240	14.000	1.1013
Keratin 50% FeCl ₂ 0.2% Ethylene Glycol 10% Saponin 0.3%	150	420	34.884	1.1081
Keratin 50% FeCl ₂ 0.2% Ethylene Glycol 10% Saponin 0.3% FeSO ₄ 5%	690	4,800	57.143	1.1308
Keratin 30% FeCl ₂ 0.2% Ethylene Glycol 10% Saponin 0.3% FeSO ₄ 5%	1,440	4,800	35.000	1.1030

6. 액상포말에 의한 악취제어 효과 조사

가. 액상포말에 의한 물리적 악취 제어

본 연구에서 액상포말은 크게 두 가지 역할을 하는데 첫째는 미생물 운반체와 영양분으로서의 역할이고 둘째는 물리적인 차단층을 형성하여 악취물질의 공기 중으로의 확산을 방지하는 작용이다. 따라서 본 실험에서는 최적 액상포말 혼합액을 이용하여 발생시킨 포말의 물리적인 악취 저감효과를 측정해 보았다. 악취원인물질로서 돈사분뇨를 사용하였으며 측정한 악취물질은 암모니아, 황화수소, 그리고 아민류였다. Fig. 18에서 보는 바와 같이 악취의 대기 중으로의 확산을 방지하면서 그 농도를 측정할 수 있도록 샘플링 포트가 달린 컨테이너에 분뇨를 일정량 (3,500 mL) 주입시키고 암모니아, 황화수소, 아민류의 농도를 측정한 후 본 실험에서 고안된 액상포말을 분뇨 표면에 분사시켜 악취물질의 농도를 다시 측정하였다. 액상포말의 발생에 사용된 혼합액은 152 mL이었으며 생성된 포말의 부피는 약 4,800 mL이었다.



Fig. 18. 액상포말을 돈사분뇨에 분사시킨 상태

액상포말 살포 전후의 악취농도를 측정된 결과는 악취물질별로 암모니아는 Fig. 19, 황화수소는 Fig. 20, 아민류는 Fig. 21에 각각 나타나있다. 액상포말을 분사하기 전 암모니아의 농도는 218 ppm, 황화수소의 농도는 8.7 ppm, 아민류는 10 ppm이었으나 분사 직후에 바로 측정된 농도는 모두 0 ppm이었다. 본 연구에서 선택한 액상포말 지속시간의 지표인 50% drainage time인 1440분 (24시간)에 검출된 암모니아와 황화수소의 농도는 각각 50, 2.2 ppm으로 초기농도의 22.9, 25.3%만이 공기중으로 확산되어 충분한 제어효과를 보였다. 그러나 아민류의 경우는 같은 시간 경과 후 9.0 ppm이 검출되어 만족할만한 결과를 얻지 못하였다. 본 연구 결과에서 알 수 있듯이 생성된 액상포말은 단기적으로는 완벽한 물리적 차단을 통한 악취제어 효과를 나타내었지만 시간이 경과할수록 즉, 액상포말의 파괴가 진행될수록 그 악취제어 효과는 감소하였다.

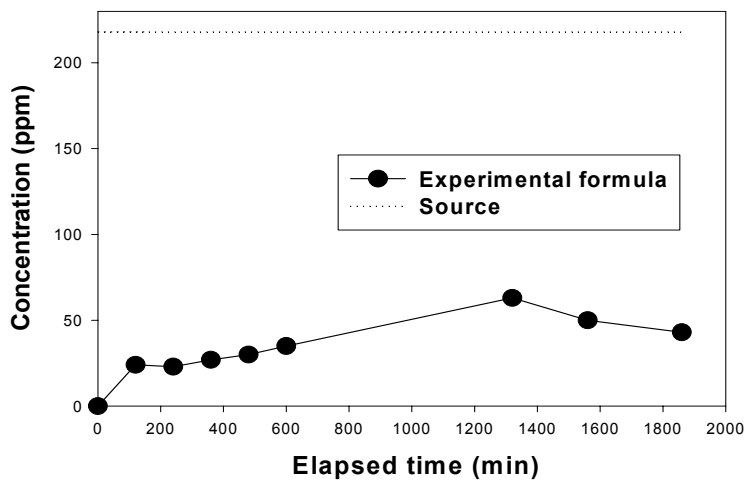


Fig. 19. 액상포말에 의한 암모니아 확산방지 효과

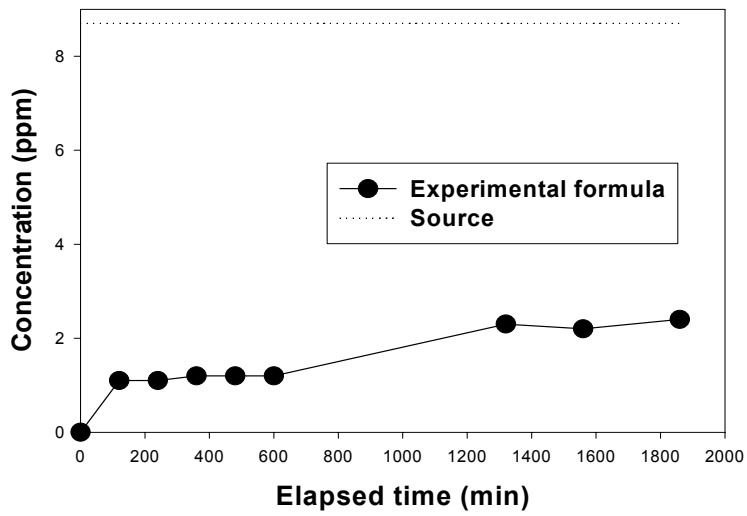


Fig. 20. 액상포말에 의한 황화수소 확산방지 효과

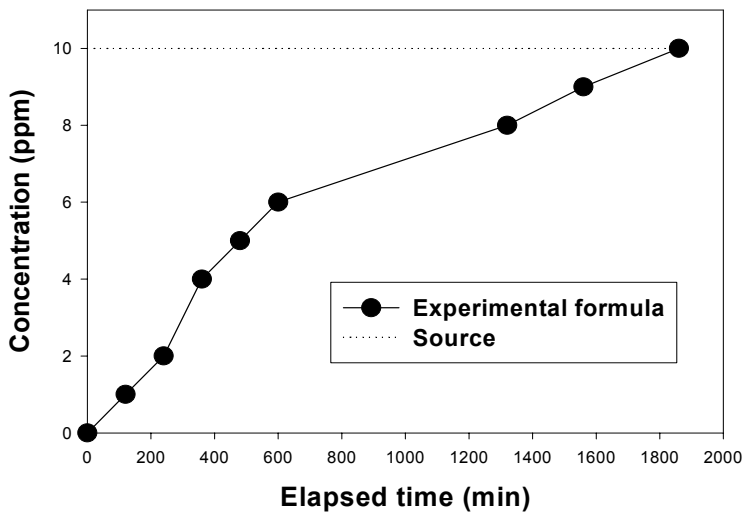


Fig. 21. 액상포말의 아민류 확산방지 효과

나. 포말 높이별 악취 제어효과

물리적인 악취의 제어효과를 알아보기 위하여 액상포말의 높이에 따른 악취제어 실험을 하였다. 돈사의 분뇨를 악취원인물질로 사용하여 암모니아와 황화수소의 시간별 농도비 (C_t/C_0)를 측정하였다. Fig. 22는 액상포말의 높이에 의한 시간별 암모니아 농도비이고 Fig. 23은 액상포말의 높이에 따른 시간별 황화수소 농도비이다. 분뇨위에 덮이는 포말의 양이 증가할수록 악취 차단 효과가 증대되어 악취물질의 통과시간이 늘어나고 악취 확산도 지연되는 것을 알 수 있었다. Fig. 22과 Fig. 23에서 보듯이 30 cm의 액상포말을 분뇨 위에 덮었을 때 암모니아와 황화수소의 대기 중 발산을 600분까지 거의 완전하게 차단하였다.

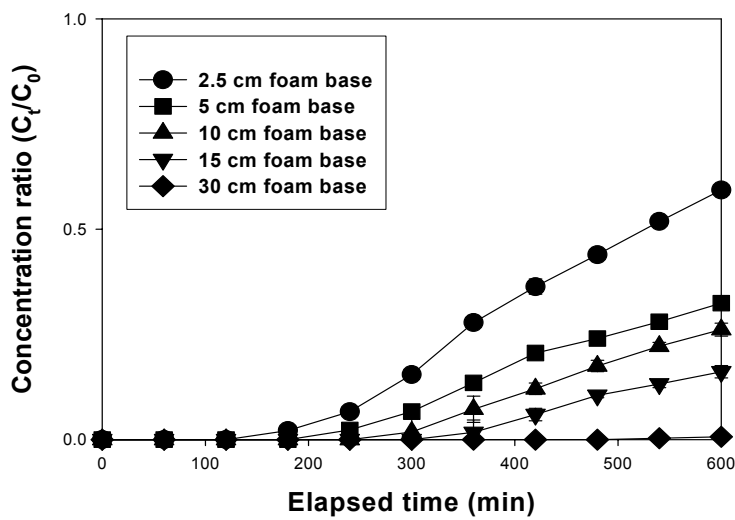


Fig. 22. 포말의 높이에 따른 암모니아 제어 효과 비교

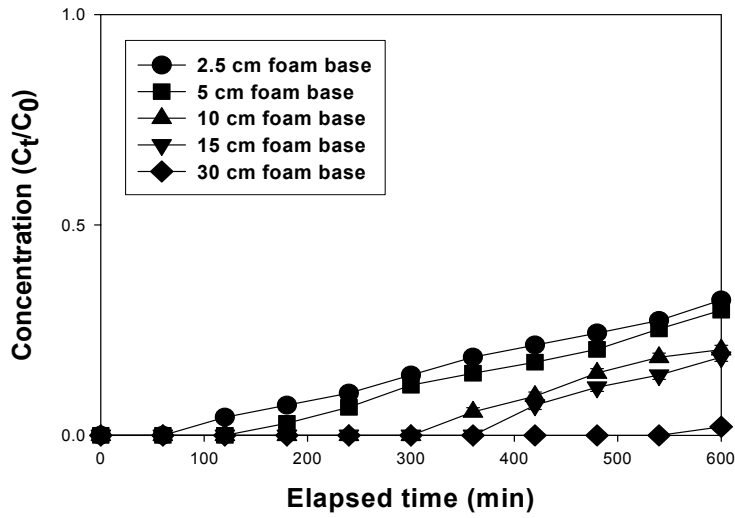


Fig. 23. 포말의 높이에 따른 황화수소 제어 효과 비교

다. 암모니아의 높이별 제어효과 해석

Table 7에는 포말 높이에 따른 암모니아 파과시간, 파과 후의 발산속도, 600분 경과 후 암모니아 농도비를 나타내었다. 포말의 높이에 따라 약취물질의 파과가 시작되는 시간은 증가하였으며 파과점 후의 발산속도는 감소하였고 그에 따라 600분 후의 암모니아 농도도 대조군과 비교하여 감소하였다.

Table 7. 높이에 따른 암모니아의 확산 특성

포말 높이 (cm)	파과시간 (min)	파과점 후 발산속도 (mg/m ³ /min)	600분에서의 농도비
2.5	177	0.2677	0.593
5	207	0.1457	0.324
10	273	0.0767	0.261
15	322	0.0600	0.131
30	482	0.0192	0.007

Fig. 24는 포말높이에 따른 암모니아의 통과시간이고 Fig. 25는 포말높이에 따른 암모니아의 방출속도이다. Fig. 26은 포말높이에 따른 600분에서의 농도비이다. 포말의 높이가 증가함에 따라 통과시간은 선형적으로 증가하였으며 암모니아의 방출속도와 600분에서의 농도비는 지수적으로 감소하였다.

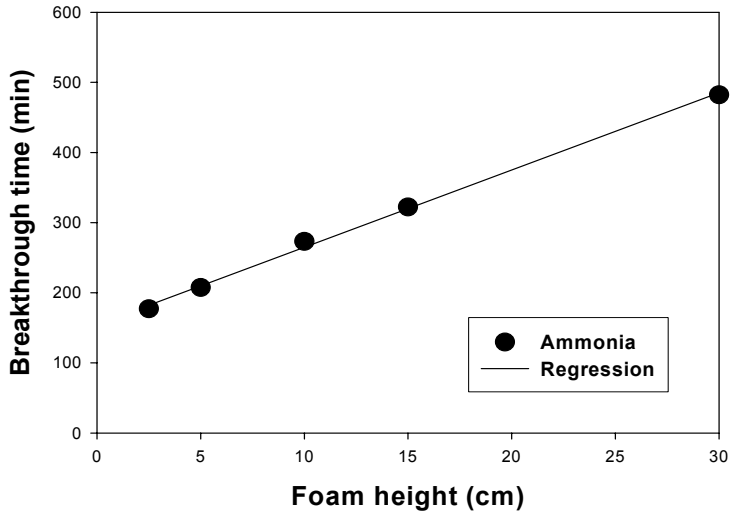


Fig. 24. 포말높이에 따른 암모니아 통과시간

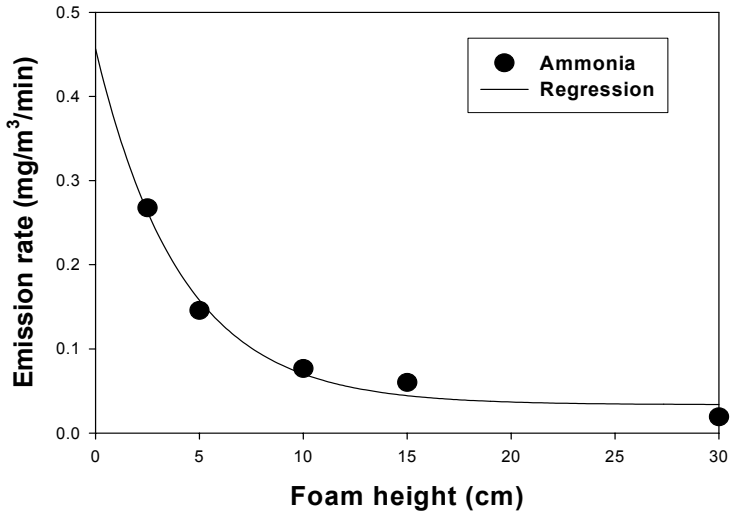


Fig. 25. 포말높이에 따른 암모니아 방출율

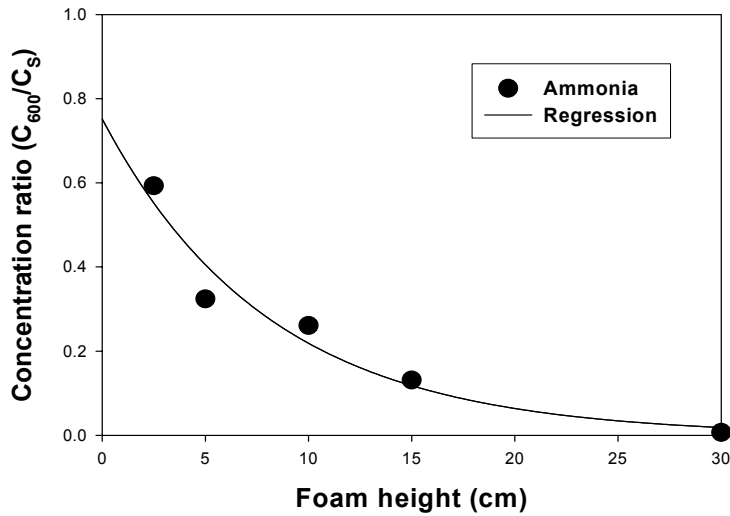


Fig. 26. 포말높이에 따른 600분에서의 농도비

라. 포말 높이에 따른 50% 배수시간

최종 포말구성성분으로 결정했던 keratin 30%, FeCl_2 0.2%, ethylene glycol 10%, saponin 0.3%, FeSO_4 5%를 사용하여 높이에 따른 50% 배수시간을 비교해 보았다 (Fig. 27). 실험에 사용된 포말발생수용액의 양은 50, 100, 200, 300, 600 mL이며 포말이 발생된 부피는 각각 2.5, 5, 10, 15, 30 cm이다. 포말의 높이가 높아짐에 따라서 50% 배수시간은 1750, 1800, 2100, 2800, 2700분으로 증가하는 것으로 보이며 15 cm 이상의 높이에서는 거의 비슷해지는 것으로 나타났다. 즉, 포말의 높이에 따른 50% 배수시간은 Fig. 28에서 보는 바와 같이 포말의 높이가 낮을 때는 급격히 증가하다가 점점 감소하는 결과를 보여주었다. 이는 악취물질의 확산을 방지하기 위한 경제적, 효과적인 포말의 높이가 존재한다는 것을 의미하며 본 실험의 경우 그 높이는 15 cm정도인 것으로 판단된다.

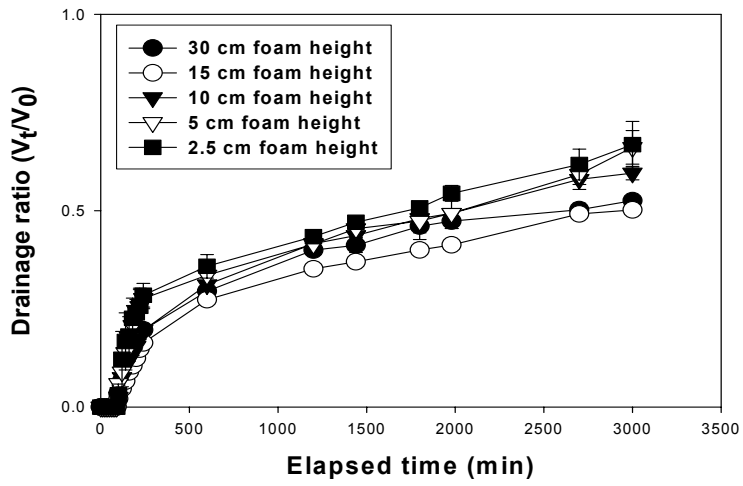


Fig. 27. 포말높이에 따른 배수특성 곡선 비교

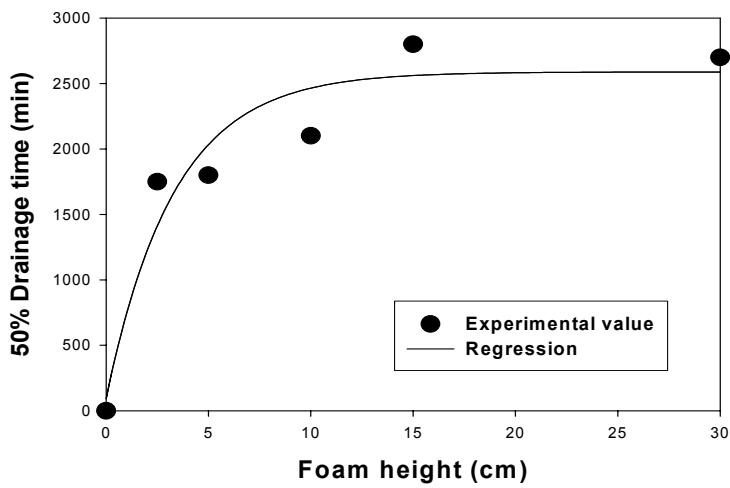


Fig. 28. 포말높이와 50%배수시간사이의 상관관계

7. 포말에서의 미생물 안정성 연구

가. 포말형성 수용액에서의 미생물 성장 확인

포말 형성 혼합액에 미생물의 성장에 필요한 무기염류와 성장을 촉진하기 위한 미세영양분 (1/10 strength TSB)을 첨가하고 pH를 중성으로 조정한 고체배지에 악취분해미생물로 알려진 *Paracoccus* sp., *Micrococcus* sp., *Alcaligenes* sp. 등 세 종류의 순수 분리된 미생물을 접종하여 30°C에서 배양하면서 성장여부를 관찰한 결과 접종한 미생물 모두 성장을 하였으나 영양배지 (TSA)에서보다는 느린 성장속도를 나타내었다 (Fig. 29).

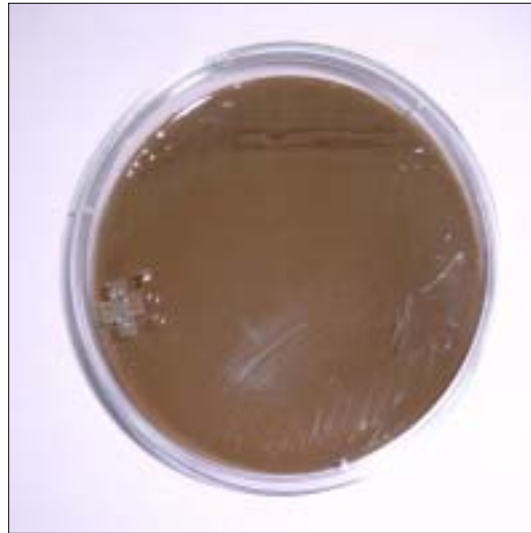


Fig. 29. 포말형성 혼합액으로 만든 고체배지에서의 *Micrococcus luteus*의 성장

나. 악취분해미생물의 포말안정성에 있어서의 영향

분해미생물이 포말안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 미생물을 첨가하여 액상포말을 발생시킨 후 포말의 50% 배수시간, 포말지속시간, 팽창비 등의 포말특성을 조사하였다. 50% 배수시간을 살펴보면 미생물이 없는 액상포말과 미생물이 첨가된 액상포말의 경우 각각 1440분, 2000분으로 나타났고 포말지속시간은 4800분으로 같았다 (Fig. 30). 또한 100 mL의 포말용액을 가지고 분해미생물이 포말부피에 미치는 영향을 실험한 결과 악취분해미생물군이 없는 액상포말과 악취분해미생물군이 존재하는 액상포말의 팽창비는 각각 39배, 40.7배로 매우 유사한 값을 나타내었다. 액상포말 내에 미생물을 주입하는 것이 포말의 특성에 아무런 영향도 주지 않음을 확인하였다.

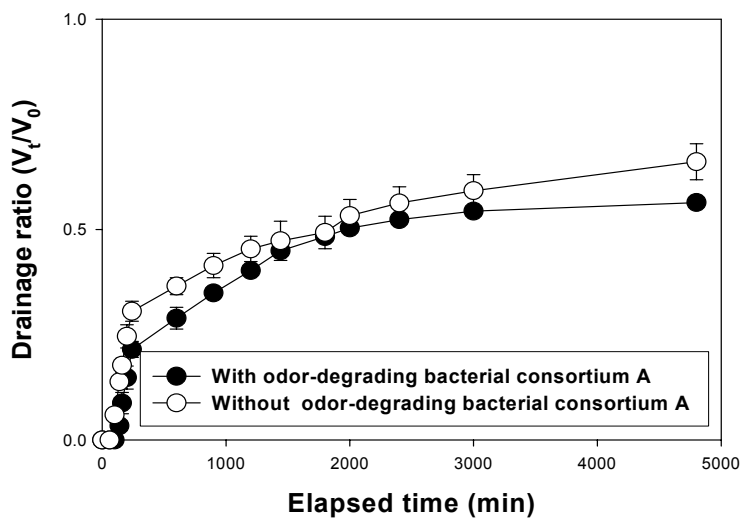


Fig. 30. 분해미생물이 포말 안정성에 미치는 영향

다. 포말발생용액에서의 악취분해미생물의 생존성

포말발생용액에서 악취분해미생물이 생존할 수 있는지를 알아보기 위해서 표준평판배양법을 이용하여 48시간 동안 생존 미생물의 수를 측정하였다. 실험초기에 첨가한 $6.3 \times 10^5/\text{mL}$, 48시간 후에는 $5.5 \times 10^5/\text{mL}$ 로 유의성 있는 차이를 보이지 않았다.

라. 포말발생과정 중 악취분해미생물의 생존성

포말발생을 위해 30 psi의 압력으로 Air compressor를 가동시킬 때 미생물의 생존성을 조사하기 위하여 포말발생 후 배수된 용액과 포말에서 각각 시료를 채취하여 미생물의 수를 측정하였다. 포말발생 전 첨가한 미생물의 개체수는 $1.4 \times 10^6/\text{mL}$ 이었으며 포말발생 후 배수된 액체에서는 $3.8 \times 10^6/\text{mL}$, 포말에서는 $1.3 \times 10^6/\text{mL}$ 의 미생물이 존재하였다. 따라서 본 실험에 사용된 포말발생 조건은 미생물의 생존에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

8. 액상포말-미생물 담체의 성능 조사

가. 악취제어효과

연속식 미생물 배양기에서 배양되고 있는 미생물을 포말형성수용액에 혼합하여 악취물질의 제어효과를 알아보았다. 악취원인물질로서 돈사분뇨를 사용하였고 측정된 악취물질은 암모니아와 황화수소였다. Fig. 31은 분뇨통, 포말을 덮은 분뇨통, 포말과 미생물을 혼합하여 뿌린 분뇨통에서 측정된 암모니아 농도이고 Fig. 32은 황화수소의 농도를 시간대 별로 나타낸 그래프이다. 액상포말이나 미생물을 추가하기 전 암모니아와 황화수소의 농도는 각각 $169.4 \text{ mg}/\text{m}^3$, $9.9 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이었으나 분사 후 바로 측정된 농도는 모두 $0 \text{ mg}/\text{m}^3$, $0 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이었다. 또한 포말의 50% 배수시간인 1440분에서 검출된 암모니아와 황화수소는 액상포말에서 각각 $91.4 \text{ mg}/\text{m}^3$, $3.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이었고, 액상포말-미생물담체에서는 각각 $84.0 \text{ mg}/\text{m}^3$, $3.1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이었

다. 이것은 액상포말에서 암모니아 초기농도의 54%, 황화수소 초기농도의 34%가 공기 중으로 확산된 수치이며, 액상포말-미생물담체에서는 암모니아 초기농도의 50%, 황화수소 초기농도의 31%만이 대기 중으로 확산되었다. 이 결과로 볼 때 액상포말-미생물담체는 약취제어에 효과가 있는 것으로 보여 진다.

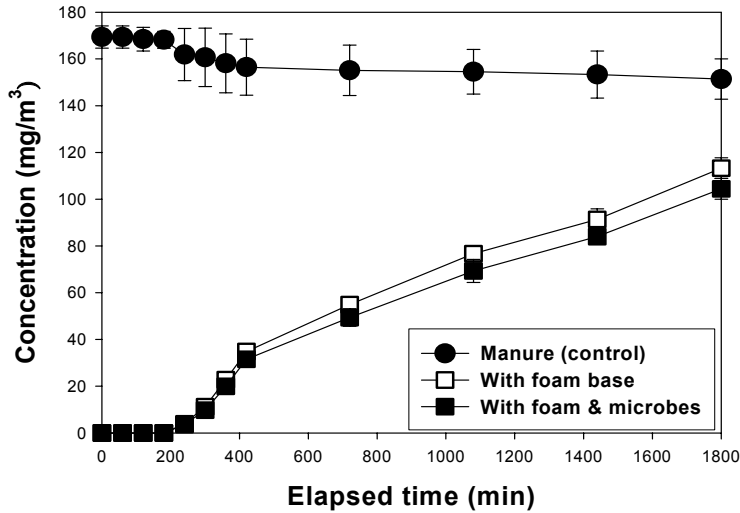


Fig. 31. 분뇨통에서의 포말 및 미생물에 의한 암모니아 제어효과

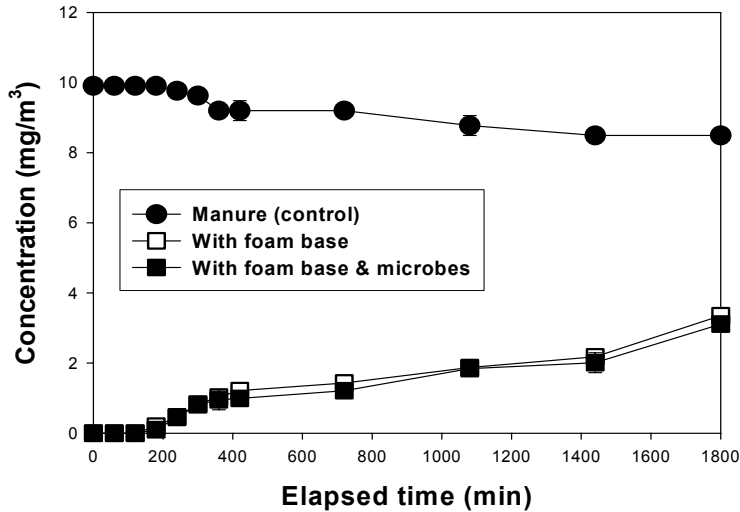


Fig. 32. 분뇨통에서의 포말 및 미생물에 의한 황화수소 제어효과

나. 암모니아의 질소전환

포말과 미생물에 의한 악취 제어효과의 차이가 크지 않아서 미생물에 의한 암모니아 분해가 일어나는지를 질소 발생량을 측정하여 알아보았다. 대조군은 5000 L 분뇨통에 3.5 L의 돼지 분뇨를 넣고 처음과 1800분 후의 N_2 발생량을 측정하고 실험군은 액상포말과 악취분해미생물군을 넣고 처음과 1800분 후의 N_2 발생량을 측정하였다. 대조군과 실험군을 비교하면 배양된 미생물에 의해 0.0866 mM의 암모니아가 질소로 전환됨을 알 수 있었다. 이 값은 암모니아 283 mg/m³가 분해되어 N_2 로 변화된 값이다.

9. 악취제어 첨가물질의 주입에 의한 악취제어 효과 조사

가. $Ca(H_2PO_4)_2$ 의 악취제어효과

암모니아의 제어효과를 높이기 위해서 포말형성수용액에 ammonia-binding 물질인 $Ca(H_2PO_4)_2$ 를 넣고 실험하였다. Fig. 33은 $Ca(H_2PO_4)_2$ 를 농도별로 사용하여 제어된 암모니아 농도를 나타내었고 Fig. 34은 황화수소에 대한 $Ca(H_2PO_4)_2$ 의 농도별 효과이다. $Ca(H_2PO_4)_2$ 를 추가한 포말을 뿌리기 전 암모니아와 황화수소 농도는 각각 309.8 mg/m³, 12.8 mg/m³이었으나 분사 후 바로 측정된 농도는 모두 0 mg/m³, 0 mg/m³이었다. 하지만 1%의 $Ca(H_2PO_4)_2$ 를 넣었을 때 50% 배수시간인 1440분에서 검출된 암모니아와 황화수소 농도는 각각 43.3 mg/m³, 3.8 mg/m³이었다. 이 수치는 공기 중으로 암모니아 초기 농도의 14%, 황화수소 초기 농도의 30%만 확산된 결과이다. 이 결과로 $Ca(H_2PO_4)_2$ 는 농도가 높아짐에 따라 암모니아 제거에 효과가 있는 것으로 나타났지만 황화수소 제거에는 별 영향을 미치지 않는 것으로 보여 진다.

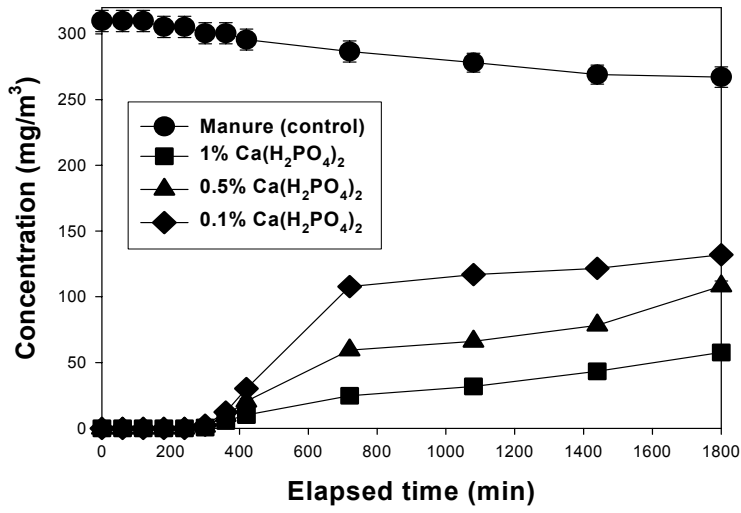


Fig. 33. Ca(H₂PO₄)₂에 의한 농도별 암모니아 제어효과

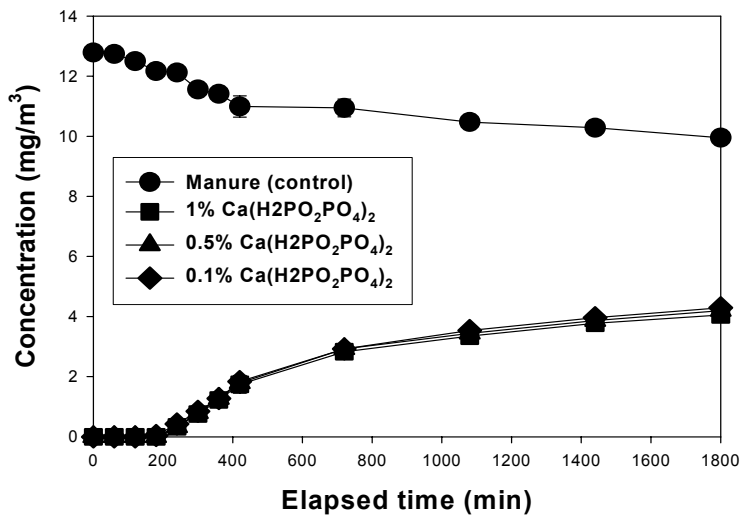


Fig. 34. Ca(H₂PO₄)₂에 의한 농도별 황화수소 제어효과

나. Yucca extracts의 악취제어효과

암모니아의 제어효과를 증가시키기 위해서 포말형성수용액에 또 다른 ammonia-binding효과가 있는 Yucca extracts를 넣고 실험하였다. Fig. 35는 Yucca extracts를 농도별로 사용하여 제어된 암모니아 농도를 나타내었고 Fig. 36은 황화수소에 대한 Yucca extracts의 농도별 효과이다. Yucca extracts를 추가한 포말을 뿌리기 전 암모니아와 황화수소 농도는 각각 233.5 mg/m³, 10.14 mg/m³이었으나 분사 후 바로 측정된 농도는 모두 0 mg/m³, 0 mg/m³이었다. 하지만 50% 배수시간인 1440분에서 1% Yucca extracts를 추가했을 때 검출된 암모니아와 황화수소 농도는 각각 94.4 mg/m³, 3.3 mg/m³이었다. 이 수치는 공기 중으로 암모니아 초기 농도의 40%, 황화수소 초기 농도의 33%만 확산된 결과이다. 이 결과를 볼 때 Yucca extracts는 암모니아 제거에 효과가 있는 것으로 나타났으며 황화수소 제어에는 Yucca extracts의 농도가 증가함에도 불구하고 제어효과가 없는 것으로 나타났다.

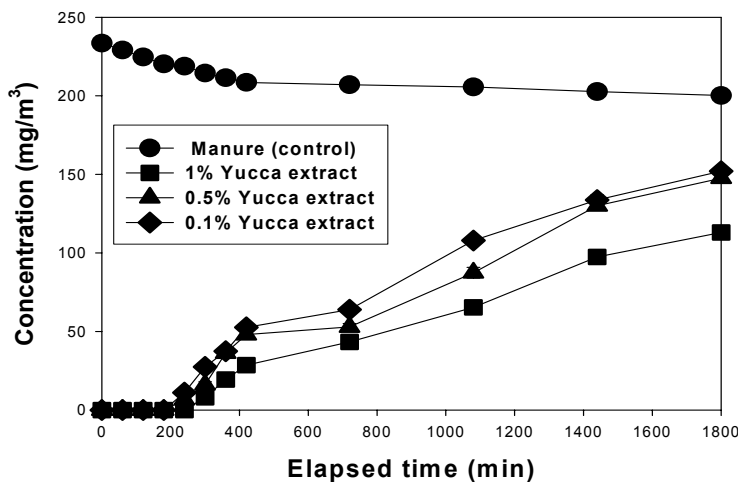


Fig. 35. Yucca extracts에 의한 농도별 암모니아 제어 효과

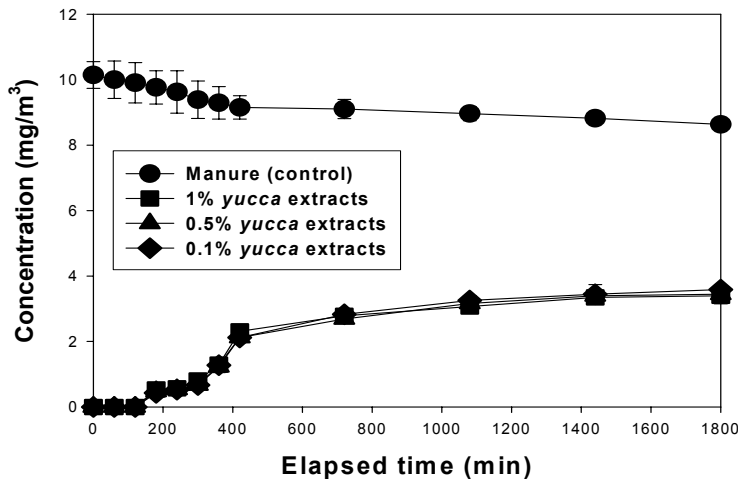


Fig. 36. Yucca extracts에 의한 농도별 황화수소 제어 효과

다. 액상포말-미생물담체에 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 의 첨가 시 악취제어효과

포말형성수용액에 악취분해미생물군과 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 를 첨가하여 악취의 제어효과를 알아보았다. Fig. 37은 1% $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 와 악취분해미생물군을 사용하여 제어된 암모니아 농도를 나타내었고 Fig. 38은 황화수소에 대한 1% $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 와 악취분해미생물군의 제어효과이다. 1% $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 와 악취분해미생물군을 추가한 포말을 뿌리기 전 암모니아와 황화수소 농도는 각각 101.2 mg/m^3 , 7.8 mg/m^3 이었으나 분사 후 바로 측정된 농도는 모두 0 mg/m^3 , 0 mg/m^3 이었다. 그러나 50% 배수 시간인 1440분에서 검출된 암모니아와 황화수소 농도는 각각 15.2 mg/m^3 , 2.5 mg/m^3 이었다. 이 결과는 공기 중으로 암모니아 초기 농도의 15%, 황화수소 초기 농도의 32%가 방출된 결과이다. 이 결과로 악취물질분해 미생물군과 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 를 혼합했을 때 더 높은 암모니아 제거에 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 배양된 미생물에 의해 0.5887 mM 의 암모니아가 질소로 전환됨을 알 수 있었다. 이 값은 암모니아 1925 mg/m^3 가 분해되어 N_2 로 변화된 값이다.

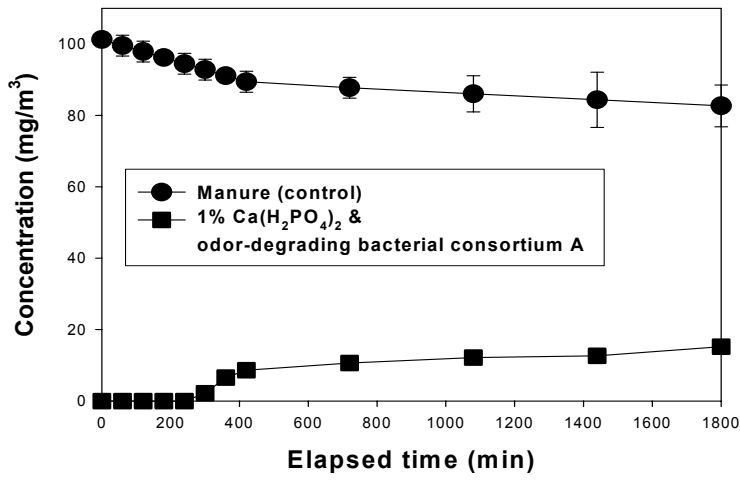


Fig. 37. 1% Ca(H₂PO₄)₂와 악취물질 분해 미생물군의 암모니아 제어효과

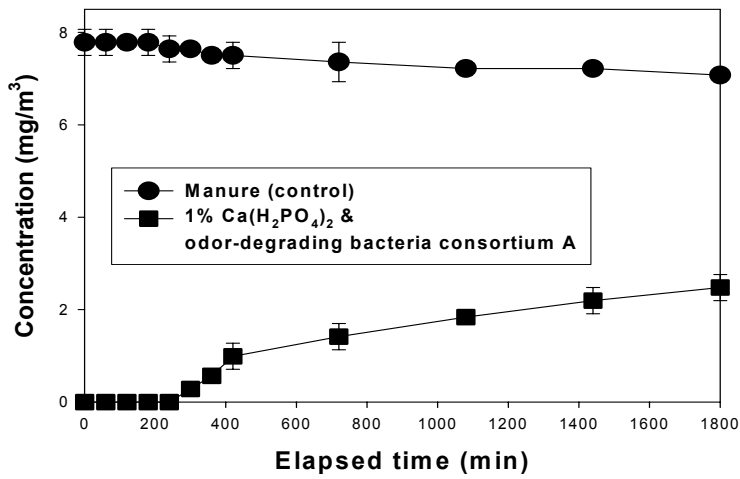


Fig. 38. 1% Ca(H₂PO₄)₂와 악취물질 분해 미생물군의 황화수소 제어효과

라. 액상포말-미생물담체에 Yucca extracts의 첨가 시 악취제어효과

포말형성수용액에 악취물질 분해 미생물군과 Yucca extracts를 첨가하여 악취의 제어효과를 알아보았다. Fig. 39는 1% Yucca extracts와 악취물질 분해 미생물군의 혼합 시 제어된 암모니아 농도를 나타내었고 Fig. 40은 1% Yucca extracts와 악취물질 분해 미생물군의 혼합 시 황화수소의 제어효과이다. 1% Yucca extracts와 악취물질 분해 미생물군을 추가한 포말을 분뇨에 덮기 전 암모니아와 황화수소 농도는 각각 126.6 mg/m^3 , 9.2 mg/m^3 이었으나 분사 후 바로 측정된 농도는 각각 0 mg/m^3 , 0 mg/m^3 이었다. 그러나 50% 배수시간인 1440분에서 검출된 암모니아와 황화수소 농도는 각각 9.2 mg/m^3 , 3.1 mg/m^3 이었다. 이 결과는 대기 중으로 암모니아 초기 농도의 17%, 황화수소 초기 농도의 34%가 방출된 결과이다. 또한 배양된 미생물에 의해 0.7012 mM의 암모니아가 질소로 전환됨을 알 수 있었다. 이 값은 암모니아 2293 mg/m^3 가 분해되어 N_2 로 변화된 값이다. 이 결과로 악취물질 분해 미생물군과 Yucca extracts를 혼합했을 때 암모니아 제거에 높은 효과가 있는 것으로 보여 진다.

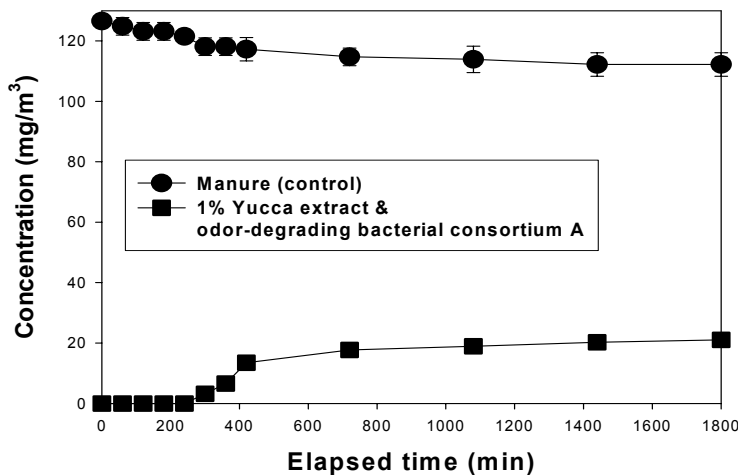


Fig. 39. 1% Yucca extracts와 악취물질 분해 미생물군의 암모니아 제어효과

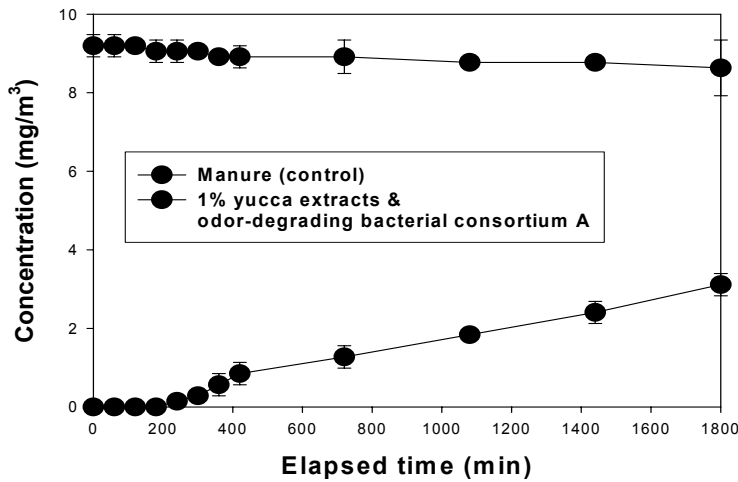


Fig. 40. 1% Yucca extracts와 악취물질 분해 미생물군의 황화수소 제어효과

마. 액상포말-미생물담체에 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, Yucca extracts 첨가 시 악취제어효과

최종적으로 포말형성수용액에 악취물질 분해 미생물군, 1% $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, 1% Yucca extracts를 첨가하여 악취의 제어효과를 알아보았다. Fig. 41은 악취물질 분해 미생물군, 1% $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, 1% Yucca extracts를 사용하여 제어된 시간별 암모니아 농도를 나타내었고 Fig. 42는 황화수소에 대한 악취물질 분해 미생물군, 1% $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, 1% Yucca extracts의 농도이다.

악취물질 분해 미생물군, 1% $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, 1% Yucca extracts를 추가한 포말을 뿌리기 전 암모니아와 황화수소 농도는 각각 172.1 mg/m^3 , 8.5 mg/m^3 이었으며 분사 후 바로 측정된 농도는 모두 0 mg/m^3 , 0 mg/m^3 이었다. 또한 50% 배수시간인 1440분에서 검출된 암모니아와 황화수소 농도는 각각 18.1 mg/m^3 , 2.1 mg/m^3 이었다. 이 결과는 대기 중으로 암모니아 초기 농도의 11%, 황화수소 초기 농도의 25%가 확산된 결과이다. 이 결과로 악취물질 분해 미생물군, 1% $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, 1% Yucca extracts를 혼합했을 때 악취 제어에 가장 높은 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 미생물에 의해 암모니아가 질소로 전환된 양은 1.2510 mM 이었으며 이

값은 암모니아 4090 mg/m³가 분해되어 N₂로 변화된 값이다.

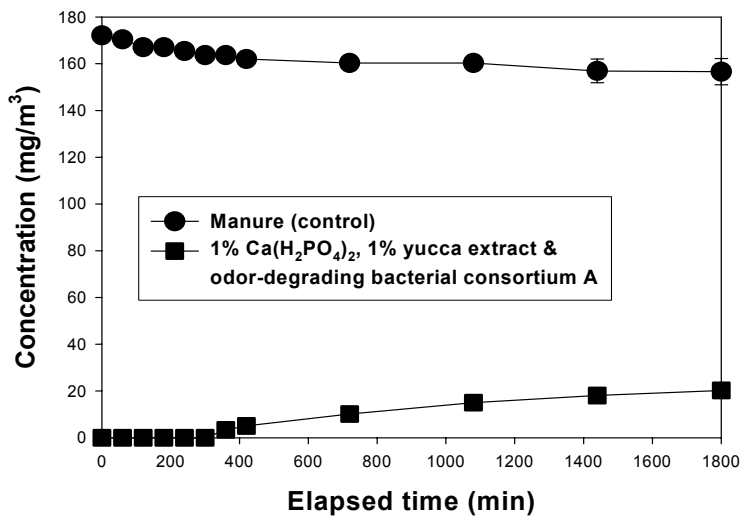


Fig. 41. 악취물질 분해 미생물군, 1% Ca(H₂PO₄)₂, 1% Yucca extracts의 암모니아 제어효과

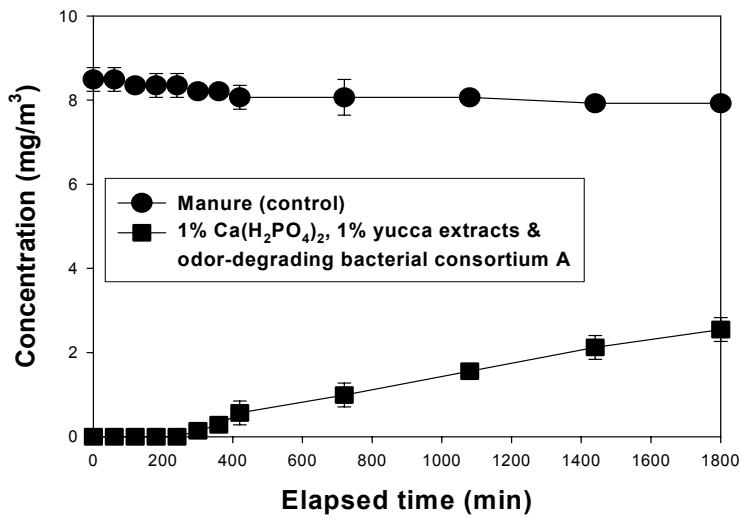


Fig. 42. 악취물질 분해 미생물군, 1% Ca(H₂PO₄)₂, 1% Yucca extracts의 황화수소 제어효과

10. 원위치 생산 현장적용시스템의 설계

이동식 현장적용시스템은 연속식 분사 구조로의 개조, 이동성의 향상, 사용의 편리와 안전에 주안점을 두며 설계를 하였다.

가. 연속식 분사 구조

본 연구에서 제작한 이동식 포말발생기가 이전 연구 단계에서 사용했던 실험실용 포말발생기와 가지는 가장 큰 차이점은 포말을 연속해서 발생 시킬 수 있다는 점이다. 실험실 규모의 연구에서 지금까지 사용한 포말 발생기 (Fig. 43)는 구조적으로 연속적인 사용과 다량의 포말 생산이 불가능하였다. 기존의 실험실용 포말발생기에서는 포말형성 수용액이 유리구슬이 들어 있는 칼럼 내로 적당량 들어가면 칼럼을 밀폐 시킨 후 가동 시키게끔 제작 되어졌는데, 한번 포말을 발생 시키고 나면 칼럼 안에 포말이 가득 차 수용액을 다시 넣을 수가 없었다. 그리하여 다시 사용을 하려면 칼럼 안에 있는 포말을 제거해 주어 수용액이 다시 들어갈 수 있도록 공간을 만들어주어야 했다. 그러나 현장에서 사용될 포말발생기 시제품은 이러한 문제점을 개선하여 연속적으로 사용할 수 있도록 아래 Fig. 44와 같이 air compressor를 혼합조와 칼럼에 모두 연결한 구조로 제작하였다. 그리하여 포말발생기가 가동 되고 있는 상태에서 포말형성 수용액과 공기가 고압으로 칼럼 내로 계속 흘러들어가, 칼럼 내의 잔류 포말을 연속적으로 밀어 내면서 포말을 형성 시키도록 하였다.

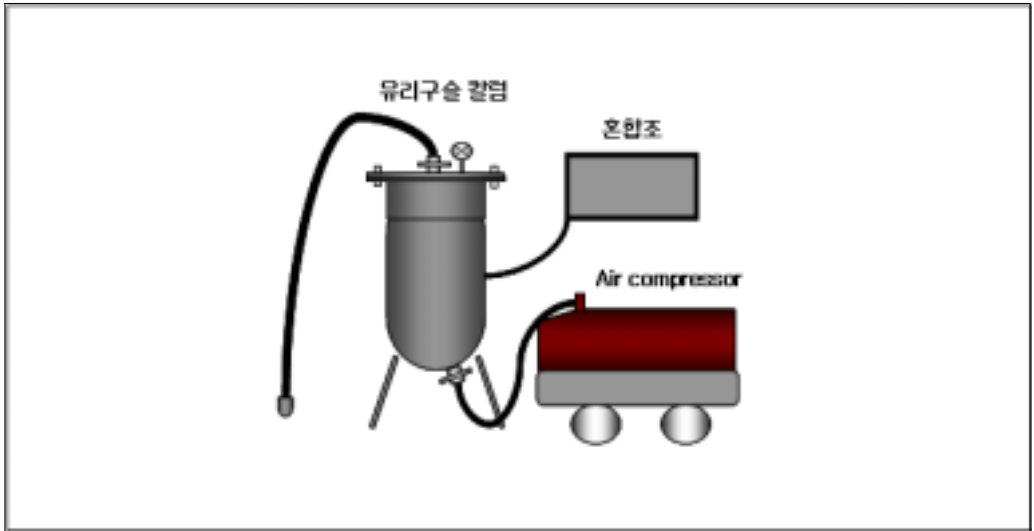


Fig. 43. 실험실용 포말 발생기의 구조

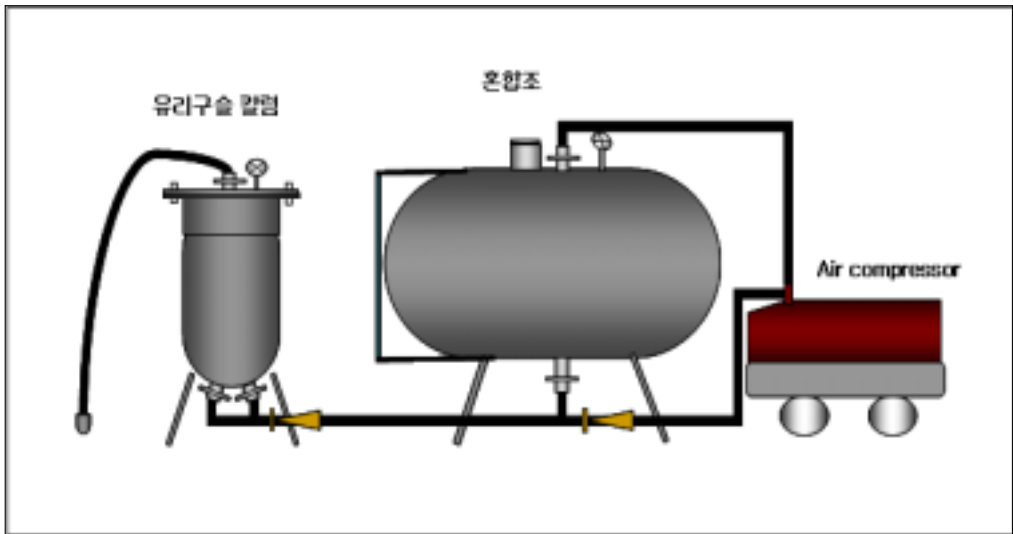
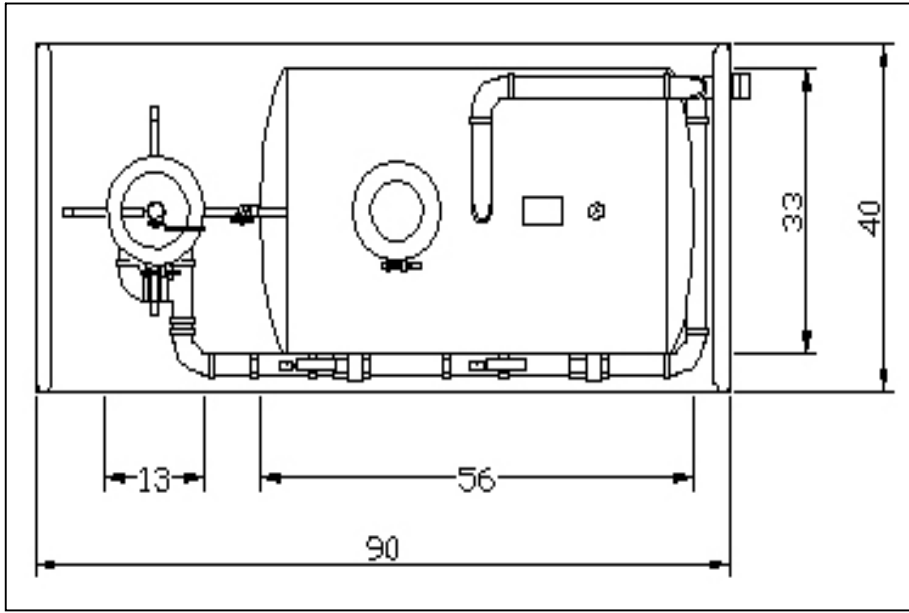


Fig. 44. 이동식 포말발생기의 구조

나. 이동성의 향상

이동식 포말발생기가 가지는 또 다른 특징은, 이름에서도 나타나듯이 이동이 용이하도록 설계됐다는 점이다. 기존의 실험실용 포말발생기가 각 부분별로 개별 개체였던 것과는 달리, 이동식 포말발생기는 air compressor를 제외한 나머지 부분들을 일체형으로 설계하여 한 번에 이동이 가능하도록 하였을 뿐만 아니라, 사용할 때마다 합체 및 분리하는 번거로움을 없앴다. 또한, 기기의 모든 부분을 하나의 밑판에 고정시킴으로써 이후에 더 큰 크기로 제작할 경우 간단히 바퀴를 달아서 수레형태로 이동 할 수 있게끔 설계 되었다. Air compressor의 경우, 현장 특성 별로 용량을 달리 사용해야하고, 따로 제작할 필요 없이 완제품으로 시판이 되는 제품을 사용하기 때문에 일체형으로 합칠 필요성이 적다고 판단하여 제외 시켰다. 기기의 각 부분들을 최대한 집약적으로 배치하여 전체 기기의 크기를 90 cm×40 cm×50 cm(가로×세로×높이)로 최소화 시킬 수 있었다(Fig. 45).



(a) 설계 평면도

(b) 실물 사진

Fig. 45. 이동식 포말발생기를 일체형으로 최소화 시켜 제작한 모습

다. 사용의 편리성과 안전성 확보

사용을 손쉽고 안전하게 하기 위하여 사용자가 최소한의 조작만으로 작동 및 관리 할 수 있고, 한눈에 기기의 상태를 점검 할 수 있도록 설계 하였다. 기기의 작동은 on/off 원터치 방식을 채택하여 스위치를 조작하는 것만으로 사용할 수 있게 하였으며, 사용 전 준비 작업과 사용 후 정리 작업은 기기에 포말형성수용액 대신 물을 주입하여 세척시키는 작업만으로 끝낼 수 있도록 하였다. 세부적인 조작 과정은 아래 Table 8에 상세히 기록하였다.

Table 8. 이동식포말 발생기의 작동 과정

과정	세부 조작 단계
사용전처리	① 이동식 포말 발생기와 air compressor의 연결 ② 혼합조에 물을 주입 ③ air compressor 작동시켜 기기 내부 세척
기기 작동	① 모든 밸브를 잠금 ② 혼합조에 포말형성수용액 주입 ③ 혼합조 밀폐 후, air compressor 작동 ④ 분사 호스를 원하는 방향으로 위치 ⑤ 혼합조 밸브 개방 (개폐 정도 조절) ⑥ 포말 분사
사용후처리	① 혼합조에 물을 주입 ② air compressor 작동시켜 기기 내부 세척 ③ 이동식 포말 발생기와 air compressor을 분리 ④ 이동식 포말발생기의 건조 및 보관

안전문제 및 압력 측정을 위해 혼합조와 칼럼에 각각 압력계를 장착하였고 air compressor에는 유량계를 장치하였으며 압력이 5기압 이상이 되었을 때 자동으로 압력을 낮춰주는 안전장치를 설치하였다. 또한, 발생기를 반복적으로 작동/정지 시키는 과정에서 포말 수용액의 역류를 막기 위하여 칼럼과 혼합조, 혼합조와 air compressor를 연결 하는 파이프 중간에 각각 역류방지 밸브 (check valve)를 장착

하였다. 사용자의 편의를 위하여 발생기와 air compressor의 연결 부위에는 윈터치식 연결 밸브를 사용하는 한편, 혼합조에 들어있는 포말발생 수용액의 양을 한눈에 알아보기 위한 장치도 혼합조에 부착하였다. 포말분사호스는 자유자재로 움직일 수 있는 긴 호스 끝에 1m 길이의 분사봉을 달아 현장에서의 적용성 향상을 꾀하였다. 모든 부분은 압력과 부식에 견딜 수 있도록 stainless steal로 제작이 되었다 (Fig. 46).



(a) 압력계 및 안전장치



(b) 윈터치식 연결 밸브



(c) 저류량 확인관



(d) 역류방지 밸브

Fig. 46. 이동식 포말발생기의 세부 장치

라. 이동식 포말발생기의 설계도면 작성

설계가 완성된 이후, 기기제작 의뢰와 향후 설계 수정을 용이하게 하고, 기기 치수를 고정시키기 위하여 설계도면을 제작하였다. 설계도면은 Auto CAD 2005를 이용하여 제작 되었으며 앞에서 언급되었던 설계상의 고려사항들이 모두 설계에 반영 되었다. 작성 된 설계도면들은 별도의 책자에 정리하였다.

11. 현장적용가능성 검증

가. 정상 작동 및 안전성 검사

설계한 도면에 따라 제작된 이동식 포말발생기는 본격적인 포말 발생 실험에 앞서 기기의 정상 작동 여부와 기본적 성능 검사를 할 필요가 있었다. 가장 먼저 실시한 기본 검사 항목으로는 기기에서의 압력의 누출 여부, 고압에 견딜 수 있는지 여부, 그리고 정상적인 분사 가능 여부가 있었으며 검사 방법과 결과는 아래 Table 9와 같다.

Table 9. 선행 검사 항목과 결과

검사 항목명	검사 방법	검사 결과
압력 누출 검사	- 기기 부품의 연결 부위에 비눗물을 바르고 포말발생기를 작동 - 비누 거품이 형성되는지 여부를 검사	압력 누출 부위가 없는 것으로 확인
고압에 대한 내구성 검사	- 분사 밸브를 잠근 상태에서 air compressor을 작동 시켜 고압에서도 기기가 파손 없이 견딜 수 있는지 확인	3 kgf/cm ² 의 압력에서도 아무런 문제가 발생하지 않음을 확인
정상적 분사 여부 검사	- 혼합조에 물을 주입하여 정상적인 분사 여부를 확인	안정적이고 균일한 분사 확인
결론	- 기기가 계획대로 정상 작동하고 안전함을 검증	

나. 포말 발생 여부 및 분사 형태 확인 실험

① 기본적 사항

포말형성 수용액을 새로 제작한 이동식 포말발생기에 주입하여 작동시킴으로써 실험실에서 수행했던 실험들과 결과 차이가 있는지를 비교하였다. 새로 제작한 이동식 포말발생기는 실험실용 포말발생기에 비하여 더 큰 용량의 air compressor를 사용 할 뿐만 아니라, 유리구슬 칼럼의 크기와, 분사 호스의 길이가 다르고, 또한 연속식 분사를 위해 구조도 변경이 되었는데 이로 인하여 포말의 성질이나 분사 형태가 달라질 여지가 있어 확인 실험이 필요 하였다. 아래 Table 10은 포말 발생 결과에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상했던 이동식 포말발생기와 실험실용 포말 발생기의 구조적 차이점을 정리한 것이다.

Table 10. 실험실용 포말발생기와 이동식 포말발생기의 차이

항목	실험실용 포말발생기	이동식 포말발생기
air compressor 용량	0.75 Hp	2.0 Hp
칼럼의 크기	내부 직경: 7 cm 길이: 25 cm	내부 직경: 8 cm 길이: 28.5 cm
분사 호스의 길이	50 cm	호스 200 cm + 분사봉 100 cm
분사 노즐의 직경	5 mm	7 mm
분사 구조	일회식	연속식

② 실험 방법

포말의 정상적인 형성과 분사 확인 실험을 위하여 앞서 실시한 연구에 의하여 개발한 포말형성 수용액을 혼합조에 3 L씩 주입하여 실험을 실시하였다. 기기 작동 시에 특별한 조작 없이 포말형성 수용액을 혼합조에 주입하고, air compressor를 작동 시키고, 혼합조 밸브를 개방한 후 분사 시키는 기본적인 조작 과정을 따랐으며, 포말과 분사의 형태뿐만 아니라, 분사 거리, 생성된 포말의 부피도 측정하였다.

③ 실험 결과

실험은 예상과는 다르게 매우 실망스러운 결과를 보여주었다. 주입한 포말형성 수용액의 대부분이 포말을 형성 하지 못하고 액체 상태 그대로 분사되었다. 분사 후반부에는 폼의 형태를 띄긴 했으나 불연속적인 분무형태로 소량 분사되어 유효성을 가진다고 보기 힘들었다. 이는 Fig. 47과 Fig. 48에 잘 나타나 있다.

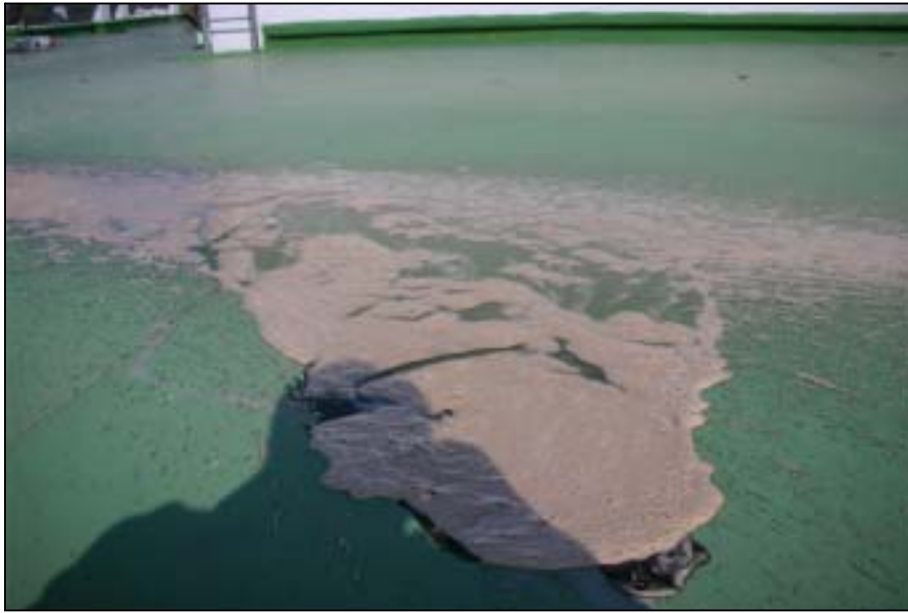


Fig. 47. 액체상태로 분사된 포말형성용액



Fig. 48. 액체상태의 용액과 소량의 포말

이러한 결과가 나온 원인은 포말형성 수용액과 공기가 적절히 혼합되지 못하였기 때문으로 사료 되었다. 혼합조와 칼럼을 잇는 밸브를 완전히 개방함으로써 공기에 비하여 월등히 많은 양의 포말형성 수용액이 칼럼 안으로 유입되어 포말이 형성되지 못하고 액체 상태로 분사가 되었다. 분사 후반부에 잠시 보인 포말은 수용액이 모두 칼럼을 지나가고 난 후, 내부에 잔류하고 있던 소량의 수용액에 의해 형성된 것으로 볼 수 있다. 따라서 기기 작동 시, 혼합조에서 칼럼내로 흘러들어가는 포말형성 수용액의 양을 적정 수준으로 조정 및 유지하는 것이 포말 형성에 매우 중요함을 확인 하였다. 다음 Table 11은 다른 항목들에 대한 측정값을 정리한 것이다.

Table 11. 이동식 포말발생기의 시운전 결과에 대한 관측 사항

측정 항목	측정값
포말 형태	대부분 액체 상태로 분사, 후반부에 소량의 정상적 포말 형성
분사 거리	6~7 m
생성 포말 부피	매우 소량, 측정 불가

다. 문제점 해결 및 성능 개선을 위한 설계 수정

공기와 포말형성 수용액이 충분하게 혼합되지 않는 문제점을 해결하기 위하여 추가 실험을 바탕으로 기기 설계의 일부를 수정하였다. 먼저, 유리구슬 칼럼 내로 유입되는 포말형성 수용액양이 공기에 비하여 월등히 높았던 것이 문제의 원인이었음을 고려하여 용액의 적정 유입 유량을 산정하는 한편, 현장에서 약식으로 적정 용액/공기 비율을 맞출 수 있는 대안을 모색하였다.

1) 포말형성 수용액의 적정 유입 유량 결정

정상적인 포말을 형성시키기 위해서는 칼럼 내로 포말형성 수용액과 공기가

알맞게 유입되어 적절히 혼합 될 수 있도록 해야 한다. 칼럼으로 유입되는 용액의 양이 너무 많으면 포말을 형성하지 못한 채 액체 상태로 분사가 되고, 반대로 너무 적으면 포말의 분사가 연속적이지 못하고 간헐적으로 이루어지게 된다. 이로 인하여 포말형성 수용액의 적정 유입 유량을 결정하는 실험은 매우 중요하다고 볼 수 있다. 정상적인 포말을 형성시키기 위하여 용액을 얼마나 유입 시켜야 하는지는 결국 포말이 정상적으로 형성 될 때 칼럼에서 얼마만큼의 용액이 유출되는지를 통해서 알아 낼 수 있다. 칼럼 내에 용액의 양이 어느 정도 존재 할 때 포말이 안정적으로 형성되는지를 확인하고 그 양을 계속 유지시켜 주면 연속적인 포말 분사가 가능하다. 따라서 본 실험에서는 포말 형성을 위한 가장 이상적인 칼럼 내 용액 존재량과 그 때에 유출되는 용액의 유량을 측정하였다.

① 실험 방법

포말형성 수용액을 유리구슬 칼럼에 각각 300 mL, 200 mL, 100 mL, 50 mL씩 직접 주입한 후 포말을 발생 시키는 실험을 실시하였다. 주입한 용액의 양에 따라 포말의 분사 형태와 포말의 상태를 비교하여 가장 이상적인 포말을 형성하는 용액의 양을 결정하였다. 그리고 그 때에 분사지속시간을 측정하여 용액의 유출 유량을 산정하였다.

② 실험 결과

포말형성 수용액을 칼럼에 100 mL 주입했을 때가 가장 적절한 것으로 결과가 나왔다. 아래 Table 12는 각 용액 주입량에 따른 결과를 정리한 것이다.

Table 12. 포말형성 수용액의 주입량에 따른 포말의 분사 형태

주입량	분사 형태
300 mL	액체 상태로 분사
200 mL	액체 상태로 분사
100 mL	정상적 포말을 형성
50 mL	확인 불가 (극소량 분사)

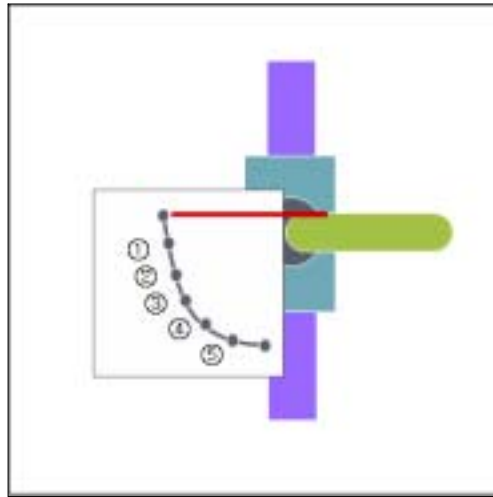
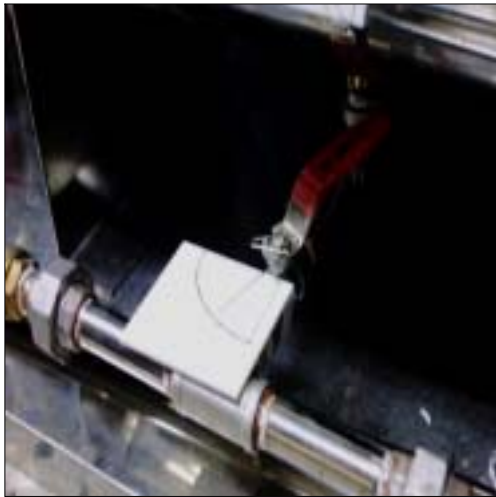
칼럼 내에 100 mL의 용액이 존재할 때, 분사지속시간은 평균적으로 약 21.1초로 측정이 되었고 이는 곧 용액이 약 4.7 mL/sec의 유량으로 칼럼에서 유출됨을 의미한다. 따라서 연속적이고 안정적인 포말 분사를 위해 칼럼 내로 유입 시켜야 하는 포말형성 수용액의 유량은 약 4.7 mL/sec임을 확인하였다.

2) 현장에서 적용 가능한 적정유량 결정의 대안

앞 실험을 통하여 구한 수치는 본 연구에서 설계한 이동식 포말발생기에 대해서 유효하지만 본 연구에서 설계된 기기와 다른 크기와 모양으로 기기를 제작한다면 유효하지 않을 것으로 예상된다. 칼럼의 크기와 사용되는 air compressor의 용량에 따라 적정유입유량이 달라질 것으로 사료되는데, 이것은 칼럼의 크기에 따라 포말을 형성 시킬 수 있는 용량이 달라지며 air compressor의 차이에 따라 유입되는 공기의 양이 차이가 날 것으로 예상되기 때문이다. 칼럼의 크기와 air compressor의 용량은 무한히 많은 조합으로 이루어질 수 있으며 그에 따라 사용자가 자신의 기기에 맞는 적정유입유량을 직접 구할 수 있는 방법을 제시하는 것이 본 연구의 중요한 과제라 할 수 있다. 본 실험에서는 그에 대한 방안으로 혼합조와 칼럼을 잇는 관의 밸브를 조절하며 포말형성 수용액의 유입유량을 조절하는 것이 유효한지에 대하여 조사를 하였으며, 기기 사용자가 현장에서 손쉽게 수행할 수 있도록 도와주는 일련의 조작 과정 가이드라인을 제시하였다.

① 실험 방법

혼합조와 칼럼을 잇는 관의 밸브를 Fig. 47과 같이 밸브의 개폐 정도를 확인할 수 있게 해주는 기관이 있는 밸브로 교체를 한 후, 혼합조에 포말형성 수용액을 200 mL 씩 주입 하였다. 혼합조 밸브가 잠긴 상태에서 air compressor를 가동시키고, 기관 상에 임의로 지정한 5개의 눈금에 각각 밸브조절바늘을 위치시키면서 분사되는 포말을 관찰하였다. 포말이 가장 안정적으로 분사되는 지점을 확인한 후, 200 mL의 용액을 혼합조에 주입하여 포말을 발생 시킨 다음, 앞서 실시한 적정유입유량 산정 실험을 통하여 발생 시킨 포말과 실험실용 포말발생기로 발생 시킨 포말의 부피와 팽창비를 비교하였다.



(a) 기관과 밸브의 사진

(b) 기관에 임의로 눈금을 매긴 모식도

Fig. 49. 개폐 정도를 확인 할 수 있는 기관이 달린 밸브

② 실험 결과

밸브의 각 위치에 따라 생성된 포말의 분사 형태와 분사지속시간을 측정한 값은 아래 Table 13과 같다.

Table 13. 밸브위치에 따른 포말의 분사지속시간과 분사형태

	밸브위치	분사지속시간	분사형태
차단 ↑ ↓ 개방	①	3분 5초	불안정하고 불규칙적인 분사
	②	43초	안정적인 분사
	③	43초	안정적인 분사
	④	40초	액체와 포말 함께 분사
	⑤	33초	액체와 포말 함께 분사

본 실험의 결과를 통하여 밸브의 개폐 조절 과정만을 통해서도 적정 용액/공기 비율을 맞춰 안정적인 포말 발생이 가능함을 확인 할 수 있다. 사용자가 현장

에서 혼합조 밸브의 적정 개폐정도를 찾는 방법을 과정별로 기술한 가이드라인은 아래 Fig. 50과 같다.

포말형성 수용액의 적정유출 조절을 위한 혼합조 밸브의 조작법

- 포말발생기 사용자는 다음과 같은 조작 과정을 따라서 안정적인 포말 분사를 위한 혼합조 밸브의 적정 개폐 위치를 찾으도록 한다.

1. 혼합조와 유리구슬 컬럼을 잇는 관의 밸브를 잠그고, 혼합조에 포말형성 수용액을 주입한다.
2. 혼합조 주입구를 밀폐 시키고 air compressor를 작동 시킨다.
3. 분사호스를 잡고 노즐을 원하는 방향으로 향하게 한다.
4. 혼합조 밸브를 조금씩 열면서 포말의 분사를 관찰한다.
5. 포말이 안정적으로 분사되는 시점에서 밸브의 개방을 멈춘다.
6. 포말의 상태가 균일하고 색이 일정한지를 확인한다.

Fig. 50. 혼합조 밸브의 적정 개폐정도를 찾는 가이드라인

라. 최종조건으로 형성시킨 포말의 특성 조사

다음 표는 200 mL의 포말형성 수용액을 사용하였을 때, (1) 분사가 안정적으로 이루어지는 지점에 밸브조절바늘을 위치시키고 발생 시킨 포말, (2) 포말형성 수용액을 적정유입유량으로 칼럼 내에 주입시켜 생성한 포말, 그리고 (3) 실험실용 포말발생기를 사용하여 발생 시킨 포말의 생성 부피와 팽창비를 나타낸 것이다 (Table 14).

Table 14. 포말발생 방식에 따른 포말의 부피와 팽창비

	포말 발생 방식		
	(1)	(2)	(3)
포말 부피	6.3 L	5.7 L	7.9 L
팽창비	31.5	28.5	39.5

밸브조절을 이용하여 발생 시킨 포말과 적정유입유량을 사용하여 발생 시킨 포말의 생성 부피는 약간의 차이를 보이긴 했으나 부피 측정 방법에 있어서 포말의 압축과 측정용기 내에 빈공간의 형성 등 측정 오차 가능성을 고려해 볼 때 큰 차이가 아닌 것으로 볼 수 있다. 반면, 이동식 포말발생기로 발생 시킨 포말이 실험실용 포말발생기에 비하여 조금 낮은 팽창비를 보였는데, 그 원인은 기기의 크기 차이에 따른 기기 내 잔류 용액량의 차이, 그리고 분사 압력의 차이에 의한 포말 압축 정도의 차이로 볼 수 있을 것이다.

최종조건으로 형성된 포말은 팽창비 뿐만 아니라 50% 배수시간과 포말지속시간도 각각 1,300분, 4,800분으로 실험실용 포말발생기로 발생시킨 포말과 매우 유사한 특성을 가짐을 확인하였다.

Fig. 51은 이동식 현장적용시스템을 이용하여 포말을 실제 분사하는 장면이고, Fig. 52는 이렇게 생성한 포말의 모습을 나타낸 것이다.



Fig. 51. 현장적용시스템의 실제 가동 모습



Fig. 52. 현장적용시스템을 통하여 생성된 액상포말-미생물담체

결론적으로 밸브의 조작만으로 정상적인 포말을 생성 시키는 것이 가능함을 확인 할 수 있으며, 이 방법은 어떠한 모양과 크기의 포말발생기에서든 사용자가 직접 현장에서 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

제 4 절 연구개발의 결론

본 연구는 암모니아나 황화수소 등의 악취유발물질이 공기 중으로 발산되기 전에 액상포말을 사용하여 일차적으로 차단한 후 포말 안에 존재하는 악취분해 미생물에 의해 악취유발물질을 분해 및 무기물화 시키는 액상포말-미생물담체를 개발과 이를 활용한 이동식 현장적용시스템을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 안정적인 포말을 형성하는 액상포말의 구성성분을 도출하고자 액상포말의 안정성에 영향을 주는 인자들에 대해 알아보고, 미생물과의 상호작용에 대한 실험을 실시하였으며 액상포말-미생물담체에 의한 악취물질 제어효과에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 현장적용시스템을 직접 설계하여 제작하였고, 이를 통한 기기의 현장적용성을 검증하였다.

세부적인 결론은 다음과 같다.

- (1) 액상포말의 안정성에 영향을 주는 인자들에 대한 실험을 한 결과, 최종 포말 발생수용액의 구성성분은 keratin 30%, FeCl_2 0.2%, ethylene glycol 10%, saponin 0.3%, FeSO_4 5%로 결정하였다. 이 때의 50% 배수시간 1,440분, 포말지속시간 4,800분, 팽창비 39.5배, 밀도 1.10 g/cm^3 이었으며 각각의 역할은 다음과 같다; Keratin은 포말의 기본이 되는 단백질 가수분해제이며 철염인 FeCl_2 와 FeSO_4 는 포말안정제로써 단백질을 응집시키고 가교결합을 형성하여 포말의 붕괴를 막아 안정성에 도움을 준다. 또한 ethylene glycol은 점성을 높이며 saponin은 생계면활성제로써 표면장력을 낮춰 팽창비를 크게 하는 역할을 한다.
- (2) 포말과 미생물과의 상호작용에 대한 실험을 하였으며 미생물을 포말발생수용액에 넣었을 경우 48시간이 지난 후 미생물 개체군 수와 처음 넣기 전의 미생물 개체군 수는 차이가 없었으며 포말발생 시 50% 배수시간이나 팽창비에 미생물이 영향을 주지 않는 것을 확인하였다. 또한 포말발생시 압력에 의한 미생물의 생존성 여부에 관한 실험을 실시하여 처음과 포말발생 후의 미생물

개체군 수의 변화가 없는 것으로 나타났다. 즉, 액상포말과 미생물간의 상호 적합성에 문제가 없는 것으로 관찰되었다.

- (3) 포말발생수용액의 양을 변화시키면서 포말높이에 따른 악취원인물질의 농도의 변화를 알아본 결과, 낮은 포말의 높이가 증가할수록 악취원인물질의 발산 제어가 향상되었으며 30 cm의 포말높이에서는 600분까지 악취가 완전히 차단되었다. 또한 포말의 높이에 따라 경과시간은 직선으로 증가하였으며 악취물질의 방출율 및 600분에서의 농도비는 지수적으로 감소하였다.
- (4) 악취제어를 위해 배양한 악취물질 분해미생물군을 사용하여 암모니아와 황화수소의 제어 효과를 실험한 결과, 미생물 단독으로 사용할 때 각각 54%, 43%가 제어되었고 포말만 사용하였을 경우 각각 42%, 73%가 차단되는 것으로 나타났다. 또한 액상포말-미생물담체를 이용했을 때 각각 90%, 75%의 제어를 보였기 때문에 악취원인물질에 따라 차이는 있지만 액상포말-미생물담체가 악취제어에 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다. 이를 종합하면 800분까지는 포말에 의한 악취물질의 차단 효과가 크게 작용하지만 그 후부터 악취물질 분해미생물군에 의한 악취물질 제어효과가 증대됨을 알 수 있었다.
- (5) 악취물질 분해미생물군을 사용하여 암모니아 분해능을 측정한 결과 1,800분이 지난 후 암모니아의 질소전환율은 21%로 미생물이 탈질작용을 하고 있음을 확인하였다.
- (6) 악취제어 효과를 증가시키기 위해 사용한 포말발생수용액에 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, Yucca extracts를 가지고 악취제어실험을 한 결과, 암모니아 제어효과는 각각 85%, 55%로 확인되었으며 황화수소는 제어효과가 거의 없는 것으로 나타났기 때문에 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 와 Yucca extracts가 암모니아 결합물질이라는 것을 확인하였다. 또한 액상포말-미생물담체에 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 와 Yucca extracts를 혼합시킨 후 악취제어 실험한 결과, 암모니아의 경우에 89% 황화수소의 경우에 86% 저감 효과를 보였다.

- (7) 이동식 현장적용시스템을 직접 설계하여 제작하였으며, 시운전을 통하여 기기의 개선점을 찾고 설계를 보완해가면서 최종 기기 설계도와 운전법을 완성하였다.

- (8) 최적 조건으로 기기를 가동시켜 발생시킨 액상포말-미생물담체의 특성을 분석한 결과, 팽창비 31.5, 50% 배수시간 1,300분, 포말지속시간 4,800분으로 현장적용이 가능함을 확인하였다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연차별 연구목표의 달성도

1. 1차년도 연구목표 달성도

1차년도에 목표했었던 연구개발내용은 현재 100% 달성해 놓은 상태이며 이에 대한 구체적인 내용은 아래 표와 같다.

연구개발목표	연구개발내용	달성도 (%)	비고
1. 흡착성 액상포말 구성성분 연구	1) 안정적인 포말을 형성하는 성분 조사 ^{a)} 2) 포말 지속시간 및 포말특성 조사 ^{b)} 3) 액상포말의 약취 제어능 조사 ^{c)} 4) 포말성분의 미생물의 영양분으로 작용 가능성 조사	100	완료
2. 실험실용 포말발생기 개발	1) Air compressor, 유리구슬이 들어있는 칼럼과 혼합기, 거품포집기 등으로 구성된 포말발생 시스템을 개발, 제작함 2) 본 발생기는 연구목적에 부합하게 필요에 따라 현장에서의 이동이 간편하고 취급이 용이하게 최소의 구성요소로 제작되었음	100	완료
3. 축산관련시설 약취성분 조사	1) BIOSIS, Agricola, PubMed 등을 이용하여 축산관련시설의 약취성분에 관한 국내외 논문조사를 수행하였음	100	완료
4. 약취분해 생물균의 선발 및 동력학적 연구	1) 예비시험 결과 선발된 미생물들을 이용하는 것보다 활성슬러지에 존재하는 미생물을 직접 이용하는 것이 더 효과적으로 판단되어 연속식 미생물배양장치 (chemostat)를 제작하여 돈사분뇨의 가스상 물질 (NH ₃ , H ₂ S, amines, volatile fatty acids 등)을 영양분으로 하여 성장하는 미생물들을 지속적으로 배양중임 2) 현재 활성슬러지 미생물들의 유지, 약취분해능 조사 및 최적분해조건 도출에 관한 연구를 수행중임. 3) 약취분해균으로 알려진 6종의 미생물을 구입하여 배양중이며 bioaugmentation의 원리를 이용하여 활성슬러지에 첨가하는 방법을 모색 중임	100	완료

- a) 여러 단백질 가수분해물질과 첨가제를 이용하여 포말을 발생시켜 그 특성을 조사하였음. 구체적으로는, 포말형성능력 및 지속시간을 Keratin과 Collagen의 비교, Keratin의 농도별 비교, 금속염의 농도별 비교, 점성제의 농도별 비교, 생계면활성제의 농도별 비교를 통하여 측정하여 최적포말형성을 위한 구성성분 및 그 함량을 결정하였음.
- b) 포말지속시간은 50% drainage time, foam lifetime을 통하여 결정하였고 포말특성은 포말의 팽창비 및 밀도를 이용하여 측정하였음.
- c) 실험용으로 제작한 컨테이너에 돈사에서 가져온 분뇨를 담고 밀봉한 상태에서 암모니아, 황화수소, 아민류의 초기농도와 포말 분사 후의 농도를 시간별로 측정하여 조사하였음.

2. 2차년도 연구목표 달성도

2차년도에 목표했던 연구개발내용은 3차년도 연구목표와 연계되는 ‘이동식 포말발생기의 제작’ 과정을 제외하면 목표했던 모든 연구가 당해에 마무리 되었다. 아래 표는 2차년도 연구의 종료시점인 2005년 7월 14일을 기준으로 작성된 것이다.

연구개발목표	연구개발내용	달성도 (%)	비고
1. 액상포말의 안정성에 영향을 미치는 인자에 관한 연구	1) 포말의특성에 관한 조사 2) 포말 점성개선물질 첨가 영향 조사 3) 무기염류가 안정성에 미치는 영향 조사	100	완료
2. 포말에서의 미생물 안정성 연구	1) 미생물이 액상포말 안정성에 미치는 영향 조사 2) 액상포말과 미생물들간의 적합성 조사 3) 포말생산, 분사 과정 중 미생물의 생존성 조사	100	완료
3. 흡착성 액상포말-미생물 담체 개발	1) 액상포말의 약취물질 흡착계수 또는 이동지연계수 도출 2) 흡착성 액상포말-미생물담체의 약취물질 분해, 제어능력 조사	100	완료
4. 포말발생기 시제품 개발 및 현장적용성 검사	1) 포말구성성분/안정화물질 함유 수용액, 약취분해 미생물, 팽창가스, 공기컴프레셔, 혼합기 등을 이용 2) 시제품 또는 유사단계의 포말발생기를 이용하여 현장에서 약취제어능 검사 실시	100	3차년도 목표와 연계

3. 3차년도 연구목표 달성도

최종보고서 작성시점인 6월13일 현재, 본 연구 시작 시 목표로 하였던 모든 연구개발 목표를 100% 달성하였으며 그 구체적인 내용은 다음 표와 같다.

연구개발목표	연구개발내용	달성도 (%)	비고
1. 흡착성 액상포말-미생물 담체 생산 이동식 시스템 개발	1) 기본 설계 요구 사항 조사 2) 이동식 포말발생기 설계 3) 설계를 바탕으로 기기 제작	100	완료
2. 현장 적용 가능성 검증	1) 기본 설계 요구 사항 점검 2) 내구성, 안전성 검사 3) 포말 발생 시험	100	완료
3. 문제점 개선을 통한 설계 수정	1) 혼합조 밸브의 개폐 정도와 포말 형태의 상관관계 검증 2) 분사 효율 증대를 위한 시험 3) 포말의 성질을 비교 및 검증	100	완료
4. 약취분해미생물 추가적 확보	1) 약취분해능 우수 미생물혼합균주 확보 (Polystar PMO)	100	완료

제 2 절 관련분야에의 기여도

본 연구에서는 흡착성 액상포말-미생물 담체를 이용한 악취제어시스템이 신속하고 효율적으로 악취원을 제어 할 수 있음을 입증하였으며, 이는 악취제어 분야에서 기존의 설치형 악취제어기술을 보완 또는 대체할 수 있는 새로운 이동식시스템의 이용 가능성을 보여주었다. 본 연구결과에 비추어 보면, 흡착성 액상포말과 미생물을 이용한 새로운 악취제어 담체는 악취물질의 발산을 원천 차단하는 것을 가능하게 함으로써 기존의 바이오필터 등과 같은 악취제어 시스템 보다 훨씬 효과적으로 악취를 제어 할 수 있을 것으로 판단이 된다.

본 연구진들이 파악한 바에 의하면 본 연구와 유사한 내용의 악취제어기술은 선진국에서도 아직 잘 알려지지 않았으며, 이에 따라 본 연구는 향후 포말-미생물 담체를 이용하는 이동식 악취제어 시스템의 신기술을 개발하는데 있어서 이론적, 실험적 근거가 될 것으로 기대가 된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구개발결과의 활용계획

- 본 연구를 통하여 개발한 기술은 미래 이동식, 적용형 악취제어 시스템을 개발하는데 바탕이 되어 향후 유사 기술의 개발에 다양한 방식으로 응용이 될 것으로 기대됨.
- 본 연구 결과 개발된 신기술은 특허출원과 산업체 기술이전을 통한 개별 단위의 상품화가 가능하며 새로운 악취제어 기술 및 상품에 대한 사회, 문화, 환경적 요구 (needs)는 충분히 형성되어 있는 상황임.
- 본 기술은 악취문제가 발생하는 시설이면 어디든지 적용할 수 있는 이동식 시스템이므로 축산관련시설이외의 시설 (예; 쓰레기매립장, 폐수처리장, 공단지역 등)에도 적용이 가능함.
- 액상포말 발생기를 저압을 이용한 스프레이 형태로 개발한다면 일상 생활용품으로도 이용이 가능하도록 제작이 가능함.
- 연구기간 중의 미국학회 발표, 영국 과학 잡지 (NewScientist)와 국내일간지 (동아일보) 소개 등을 통하여 본 연구결과물에 대한 지대한 관심을 알 수 있었으며 이에 시제품개발과 현장 적용성 검증을 한 후 국내외 발표를 통하여 연구결과물을 적극 홍보할 계획이다.

제 2 절 기대효과

1. 기술적 측면

- 기존의 설치형 악취제어기술을 보완 또는 대체하는 새로운 이동식시스템의 개발로 악취원에 대한 신속하고 효율적인 제어가 가능해짐.
- 흡착성 액상포말과 미생물을 이용한 새로운 악취제어 담체의 개발로 악취물

질의 대기 중으로의 이동 억제와 생분해가 같은 매질 내에서 동시에 가능해
짐.

- 본 기술은 축산관련시설에서 유래하는 악취뿐만 아니라 담체의 개발 여부에
따라서 타 분야의 악취제어에도 충분히 응용될 수 있으므로 타 분야로의 기
술적 파급효과는 상당히 큼.

2. 경제 · 산업적 측면

- 현재 존재하지 않는 새로운 기술의 개발 및 수출을 통한 경제적 파급효과
- 본 연구진이 파악하고 있는 바로는, 유사 기술을 이용한 상품화는 사례가 아
직 없으므로 국내 및 해외 시장개척이 용이
- 신속하고 간편한 악취제어로 축산관련시설 주변의 민원발생 경감 및 현장의
생산성 향상 효과
- 환경오염산업의 일부로 취급되어져 가는 축산업의 이미지 제고 효과

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 악취

1. 악취의 특성 및 악취 제어의 필요성

악취는 황화수소, 메르캅탄, 아민류, 기타 자극성 있는 기체성 물질이 사람의 후각을 자극하여 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새로 정의 할 수 있다. 냄새의 감지는 후각 기관에 도달하는 몇 종류의 화학적, 물리적 반응의 결과로서 휘발성 물질이 후각의 상피세포에 흡수되어 변화가 생기며 그로인한 전위적 자극이 발생하면 신경을 통해 뇌에 전달됨으로써 냄새를 감지하게 된다. 취기는 단일 물질로서도 감지 정도에 영향을 주지만 두 종류 이상의 취기 물질이 혼합되어 있는 경우, 각 화합물 간에는 취기강도를 상승시키거나 중화시키는 현상이 나타날 수 있다 (Leslie et al., 2005).

냄새를 유발하는 물질은 40만 여종 이상 알려져 있으며 휘발성이 좋고 증기압력이 크다는 공통된 특징을 가지고 있다. 이 중 악취물질은 질소 또는 황화합물이 포함되어 있고, 일반적으로 다중의 고리모양 화합물 형태를 가지면서 분자량에 따라서 냄새의 특징이 달라진다. 화학구조가 비슷하더라도 동일한 냄새를 발산하지 않으며 동일계열일 경우에 분자량이 클수록 강한 악취를 발생시키는 경향이 있다. 이러한 악취 물질의 발생은 휘발성, 증기압, 용해도, 수온, 기온, 습도 등에 따라 달라진다. 악취는 단독으로 작용되기 보다는 여러 가지 화합물이 복합적으로 작용하며 아주 미량으로도 악취를 발산하기 때문에 측정 및 분류 자체가 어려운 실정이다. 또한 악취는 지금까지 수질이나 대기오염처럼 눈에 보이는 것들이 아닌 감각공해이며 주관적이기 때문에 상대적으로 그동안 법적 규제나 기술적 연구개발이 많이 이루어지지 않았다 (Mills, 1995).

크게 악취 물질은 무기성 물질과 유기성 물질로 나누어지며 무기성 물질에는 암모니아와 황화수소가 속하며 유기성 물질에서는 유기산, 알데히드, 케톤, 아민류가 대표적이다.

악취 물질은 화학물질에 따라서는 ppb 미만의 매우 낮은 농도에서도 사람의 후각을 자극하는 감각 오염물질로 소음과 함께 주요한 민원의 대상이 되고 있다. 또한 각종 분뇨와 하수처리장이 급증하면서 효율적인 악취 제어 기술의 개발에 대한 필요성이 요구되는 실정이다. 최근 악취가 사회적인 문제로 대두되면서 악취 분석 및 규제에 관한 내용이 대폭 강화되고 있다 (Mills, 1995).

특히, 축산시설의 분뇨로부터 발생하는 악취문제는 최근 들어 축산업계의 가장 심각한 문제 중의 하나로 대두되고 있다. 이것은 생산자 자신의 문제가 아니고 주로 제 3자와의 문제라는데 그 어려움이 있으며 문제의 객관성과 구체성이 결여되어 있어서 그 방지대책을 구체화하기도 매우 어려운 실정이다. 따라서 악취 민원에 대하여 문제의 원인, 수준의 파악단계에서부터 논란이 야기될 수밖에 없다. 축산시설 중에서 돈분뇨가 환경민원의 주요 대상으로 거론되고 있는데 그 원인은 배출규모, 악취의 강도, 취급처리상의 어려움 등으로 문제가 될 뿐만 아니라 돈분뇨의 수분함량이 높고 미세입자의 함량이 높아서 기술적으로 그 처리에 난점이 있고 처리비용도 상대적으로 고가이기 때문에 전반적으로 처리가 잘 이루어지지 않기 때문이다.

돈사에서 발생하는 악취 유발 물질은 휘발성 지방산 (VFA), 암모니아, 황화수소 및 황 화합물, indole, scatole, cresol 등이다. 하지만 돼지의 품종, 급여되는 사료, 그 외 환경적인 여건에 따라 악취 유발 물질이 달라지므로 이를 개별적으로 악취화합물로 정확히 규정짓기는 어려운 실정이다 (Anderson et al., 1987; Mosquera et al., 2005)

최근에는 암모니아의 방출이 대기 오염에 큰 영향을 미친다는 주장이 제기되고 있다. 대기 중으로 암모니아가 방출이 되면 토양의 산성화와 지표수의 부영양화가 발생할 수 있는 것으로 알려지고 있다 (National Research Council, 2003).

2. 악취의 발생원

가. 암모니아의 발생원

암모니아의 주요 발생원은 동물 분뇨처리장, 비료공장, 하수 슬러지, 화학공장, 매립지 등이며 적은 양이지만 교통, 토양, 석탄 연소, 야생동물 등도 암모니아를 발

생 시킨다. 특히 발생한 지 얼마 안 된 분노와 유기물의 혐기성 분해에서 암모니아가 대량 발생되고 있으며 열에 의해 덥혀진 시설에서는 더욱 심해진다 (Buijsman et al., 1987; Kim et al., 1999).

나. 암모니아의 인체 유해성

낮은 농도에서는 눈이 따갑거나 호흡이 어렵고 혈압을 상승시키며 위장활동을 억제하고 소화액의 분비를 저해시켜 식욕 감퇴 및 구토를 야기한다. 암모니아 농도 6 ppm 이상에서는 눈이 따갑고 호흡기 질병에 걸릴 확률이 높아지며 40 ppm이 넘으면 두통, 콧물 및 재채기가 유발된다. 5,000 ppm의 암모니아 농도에 노출되었을 때는 사망할 수도 있다 (Muehling, 1970). 또한 공기 중의 먼지 (PM 2.5)와 결합한 후 폐 깊숙이 침투하여 폐질환을 일으키기도 한다 (Bari et al. 2003).

다. 황화수소의 발생원

황화수소의 인위적 발생원은 석유 정제 공정이나 피혁, 아교, 형광물질 원료 등의 제조공정 중 부산물로 발생되며 펄프 공장의 경우, 펄프원료를 수산화나트륨과 황화나트륨 존재 하에서 증류, 분해하여 셀룰로오스를 얻는 과정에서 황화수소, 메르캅탄 등을 부산물로 발생시킨다. 염료, 공업약품, 의약품의 원료로 사용되어 발생되며, 그 외 혐기성 발효가 일어날 수 있는 대도시의 하수 또는 쓰레기장 대도시의 하수 또는 쓰레기장 등에서 발생된다. 자연적으로는 화산이나 온천, 유황광산 등의 황 또는 황화합물이 존재하는 지각층에서 발생된다. 광산에서는 황철광의 분해로 대기 중으로 발생되거나 수중에 녹아 있다가 물이 흐르면서 공기 중으로 발산되며 천연가스에 섞여 있을 경우 이것의 생산, 수송, 정제 시에 발생된다. 자연적 발생량이 인공적 발생량보다 훨씬 많을 것으로 추정되지만 인위적인 발생은 한정된 지역에 국한되기 때문에 많은 피해를 끼친다 (Schiffman et al., 2001).

라. 황화수소의 인체 유해성

낮은 농도에서도 독성이 강하며 두통, 현기증, 흥분 등을 일으킨다. 저농도에서

도 장시간 노출되면 중추 신경 마비, 호흡 정지 등을 일으킬 수 있으며 고농도의 가스를 많이 흡입하면 산화 효소의 파괴로 인하여 세포의 내부 호흡이 멈추며 중추 신경이 마비되어 실신하거나 호흡 정지 및 질식 증상이 나타난다. 황화수소는 다른 악취 성분들과 달리 아주 낮은 농도에서도 감지되며 1,000 ppm의 농도에서는 즉시 의식을 잃거나 사망에 이를 수 있다 (Muehling, 1970).

제 2 절 악취 제어 기술

1. 물리화학적 처리방법

가. 세정탈취법

악취가스의 흡수 원리를 이용하는 방법으로써 악취가스를 반응액체와 직접 접촉시켜서 가스 중의 특정악취물질을 반응액 속으로 물리적 또는 화학적으로 용해 흡수시켜 악취가스 속의 악취 성분의 제거를 목적으로 한다. 휘발성 물질에 적용할 때 가장 좋은 효과를 볼 수 있으며 적은 양의 비용이 든다. 하지만 설치비용이 크고 2차적인 오염물의 처리를 해야하는 문제를 안고 있다 (Ullman et al., 2004).

나. 오존산화 탈취법

오존은 불소 다음으로 강력한 산화제로서 배가스 처리, 상수, 중수, 하수, 분뇨 처리, 조류 및 풀장의 살균 등 여러 분야에서 이용되는 화학물질이다. 특히 탈취 분야에 있어서는 차아염소산이나 과산화수소 등의 산화제와는 달리 벤젠, 톨루엔 등 유기계 가스의 분해도 가능하다는 점과 유지 관리비가 저렴하다는 점 등으로 점차 적용성이 증가되는 추세에 있다. 또한 오존의 산화작용을 이용하여 악취 성분을 분해시키지만 오존 자체에 의해 마스킹 효과를 병용하는 탈취법이다. 황화물 계통의 취기에 대하여 효과가 있으나 암모니아나 저급 아민류의 처리는 비교적 어렵다는 단점을 가지고 있다 (Ullman et al., 2004).

다. 연소법

연소법은 악취물질을 고온으로 산화 분해시키는 것으로 크게 직접 연소법, 촉매 연소법, 축열식 연소법으로 나뉜다. 연소법은 대부분의 입자상 물질 및 가스를 산화 분해할 수 있는 특징을 가지고 있지만 질소, 황, 염소, 불소 등을 함유하는 경우에는 질소산화물, 황산화물, 염산, 불산 등이 발생하기 때문에 이들 물질에 대한 처리장치를 후단부에 설치해야하는 번거로움이 있다.

직접 연소법은 700℃ 이상의 고온에서 연소 분해함으로써 그 처리의 신뢰성이 높고 온도 조절로 효과를 기대 할 수 있는 악취 처리법이다. 또 체류 시간과 온도의 설정에 따라서 거의 모든 악취유발물질을 처리할 수 있다.

촉매연소법은 백금이나 팔라듐의 촉매층을 이용하여 250~350℃에서의 저온에서 악취를 산화 분해시키는 안정된 탈취 방법이다. 처리 장치에 사용되는 촉매는 크게 귀금속을 주성분으로 한 것과 비금속을 주성분으로 한 것으로 나뉠수 있다. 모양은 알맹이 모양, 벌집 모양, 리본 모양 등이 있으며 촉매연소법에서는 평균적으로 300℃의 연소온도에 0.03초 정도 접촉시킨다.

축열식 연소법은 축열체에 의해 고효율로 95% 정도의 열회수를 하는 방법으로서 에너지 절약형 연소 탈취장치이다. 장치는 몇 개의 방으로 분할되어있으며 특수한 회전 밸브에 의해 연속적으로 배기가스를 상승류와 하강류로 바꾼다. 위쪽 부분에서는 가열기에 의해 800℃로 제어되고 배기가스는 축열재부터 열을 얻어 상승하면서 승온되어 배기된다. 악취 물질은 상승류의 고온부에서 산화 분해되고 무해화 된다. 상승류로부터 하강류로 바뀔 때 하부에 체류하고 있는 미처리 악취 물질이 정화가스에 혼합되지 않도록 깨끗한 가스로 정화하도록 되어있다 (Ullman et al., 2004).

2. 생물학적 처리방법

생물학적 처리방법 중에서 가장 대표적인 것은 생물탈취법이다. 생물탈취법은 가스상의 오염물질을 미생물, 산소, 수분 및 영양물질 등이 충족되어 있는 생물상을 통과시켜 이산화탄소와 물로 전화시키는 공정이다. 유입가스를 포화시키기 위해 수분포화장치, 충전물질이 채워진 생물탈취상이 주요한 장치이다. 이러한 생물상으

로는 자연으로부터 얻어진 토양, 퇴비, 나무껍질 등이 있으며 인공적으로도 합성이 가능하다. 오염가스는 이류, 확산, 흡착, 생물학적 분해단계를 거치면서 제거가 된다. 초기에는 흡착에 의한 제거가 주를 이루지만 후반부에서는 생물학적인 반응에 의한 제거가 주 메커니즘이 된다. 즉, 각종 미생물을 이용하여 공기 중의 악취물질을 인위적으로 제어하는 방법으로써 과거로부터 악취의 확산방지에 토양의 효과를 적극적으로 활용하였던 것과 같이 자연계에서의 미생물에 의한 생물화학적 산화분해에 의해 일어나는 탈취현상을 인위적으로 조정관리하여 효율화하는 것이다.

생물탈취법은 소각에서처럼 연료가 필요하지 않기 때문에 저에너지 소비형 기술이며 화학약품의 첨가도 필요없기 때문에 기타의 방법에 비해서 저렴한 악취제어방법이다. 또한 안전하며 미생물효소는 자생적으로 끊임없이 성장하고 처리 후 유해가스의 발생도 없다. 하지만 가스상 오염물질의 분해효율이 화합물질에 따라 다르며 생물탈취상의 유지관리에 세심한 주의가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 처리대상화합물의 종류는 생물탈취상의 오염가스 처리효율에 영향을 미치는 인자이다. 유기분자 형태의 산소, 질소, 황이온 등은 분해율을 증가시키는 반면 방향족 할로젠 이온들은 분해율을 감소시키는 경향이 있다. 무기가스들이 산화하면 염기가 소비되고 최종적으로 칼슘염이 남는다. 이들의 제거능력은 충전재료의 산중화능력에 따라 달라진다 (Burgess et al., 2001).

3. 축산관련시설에서의 악취제어방법

앞서 기술한 일반적인 악취제어방법과는 달리 본 연구의 주목적인 축산관련시설의 악취제어에는 다음과 같은 방법들도 사용되고 있다.

가. 고정식 덮개

고정식 덮개로는 콘크리트, 나무덮개, 경량지붕, 플라스틱막을 사용할 수 있다. 콘크리트나 나무덮개 등은 다른 형태의 덮개보다 비싸지만 수명이 10~15년으로 비교적 장기간 사용할 수 있다. 또 다른 형태의 덮개는 돔형 덮개로 분뇨저장조를 유연한 덮개로 씌우고 낮은 압력의 송풍기로 공기를 불어넣고 덮개 내부 압력을 유지하면서 공기 누출이 125 cfm (cubic feet per minute)가 되도록하는 방법이다.

콘크리트와 나무 덮개와 같은 영구적인 덮개와 돔형 덮개의 악취저감율은 80% 이상인 것으로 보고되고 있다. 즉, 영구적인 덮개는 암모니아 발생 저감율이 80% 이었고, 돔형 덮개는 암모니아와 황화수소의 발생량이 95% 이상 감소하였다 (Mills, 1995).

나. 부유식 덮개

부유식 덮개는 다양한 부유성 소재를 악취유발물질의 표면을 덮어 악취의 방출을 억제하는 방법으로 악취유발물질 표면에 자연적으로 박피를 형성시키는 천연 부유 덮개와 다양한 인공소재를 사용하는 biocover, synthetic cover, geotextile cover 등이 있다. 악취유발물질 표면에 덮개를 씌움으로써 저장 분뇨 액상에서 대기 중으로 악취물질들의 발산을 감소시키는 방법이다. 덮개의 재질에 따라 투과성 덮개와 불투과성 덮개로 분류한다. 밀대와 같은 투과성 덮개는 덮개의 표층에 형성된 호기층이 분뇨의 혐기 분해 과정에서 대기 중으로 방출되는 악취물질들의 일부를 투과성 덮개에서 분해하여 제거하는 방법이다. 불투과성 덮개는 악취물질을 저장조벽 근처의 연결부위를 통해 누출시키는 방식이다 (Mills, 1995).

다. 오일 및 포말 살포법

대두유와 같은 값싼 식용유나 계면활성제를 사용하여 악취를 저감시키는 방법이다. 미국 미네소타 주립대 연구팀은 돈사에서 오일을 물과 혼합하여 1일 1회에 걸쳐 약 1분간 살포한 다음 악취 저감 효과를 조사하였고 분사효율을 증대시키기 위해 계면활성제를 약 5% 첨가하여 혼합하여 사용하였다. 이들 연구에 의하면 암모니아, 황화수소, 악취강도가 각각 30%, 20%, 10% 저감되었다. 또한 코리노 등은 악취유발물질을 덮기 위한 재료로 젤을 사용하여 실험하였다. 그러나 분뇨저장 탱크 안에 연결관이나 분리벽 등이 있다면 청소하는데 어려움이 있다. 또 다른 방법으로 유연한 포말 차단벽을 만들어서 악취물질의 물질이동을 저해시키는 것이 있다. 카네바리 등은 일반적인 포말을 사용하여 휘발성 물질의 방출을 차단시키는 방법을 처음으로 제안하였고 다치 등은 오랜 시간 동안 악취유발물질의 발산을 막을 수 있는 포말 형성에 대해서 언급하기도 하였다.

오일, 포말, 젤 등을 사용하여 악취를 제어하는 방법들은 악취유발물질에 직접적으로 적용되는 방식으로 간편하며 신속하며 비용이 저렴하다는 장점이 있다 (Gautam and Mohanty, 2004).

제 3 절 미생물에 의한 악취 제거 메커니즘

생물탈취의 기본적 메커니즘은 악취성분의 용해반응, 미생물에 의한 흡수, 무취 및 저취기 물질로의 변환 등 3단계로 구성된다 (Mills, 1995; Burgess et al., 2001).

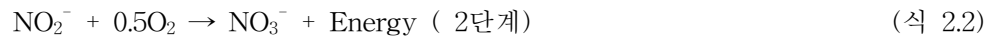
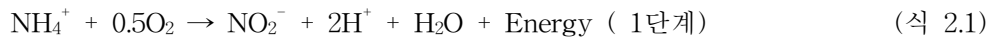
- 1단계: 가스 흡수 이론에 기초하여 용해 반응은 악취성분이 수분에 흡수 및 용해되는 단계로 악취 물질의 용해도, 접촉면적, 접촉시간 등에 영향을 받는다.
- 2단계: 생물의 세포내 흡수는 용해된 악취물질을 저분자 상태로 미생물의 세포막을 통과하여 성분이 미생물막에 흡착 반응하는 생물 흡착단계로 취기성분 및 미생물의 성장, pH, 온도, 압력 등의 여러 가지 조건에 따라 달라지지만 수중의 미생물 농도가 가장 중요한 인자이다.
- 3단계: 흡착된 취기 성분이 미생물의 증식 및 에너지원으로 사용되는 생물화분해 단계이다. 산화 분해 반응은 취기의 종류에 따라 그 분해 속도가 달라지기 때문에 각각 다른 부하한계를 가진다. 악취 분해 과정에서 여러 종류의 미생물이 관여하여 여러 단계를 지나갈 수도 있다. 최종적으로 탄화수소물질은 탄산가스와 물로, 황화합물은 아황산이온과 황산이온으로, 질소화합물은 암모늄이온, 아질산이온, 질산이온 등으로 변환된다.

1. 암모니아 제거 메커니즘

질소 분자는 대기상에서 가장 풍부한 원소로서 대부분의 미생물이 직접 이용할 수 없다. 단지 일부의 세균만이 직접적으로 질소분자를 질소원으로 이용할 수 있다. 미생물은 암모늄이온, 아질산이온, 질산이온과 같은 기타 다른 형태로 질소를 이용한다. 주로 미생물에 의한 질소 화합물의 전환은 질소 화합물의 산화 상태를

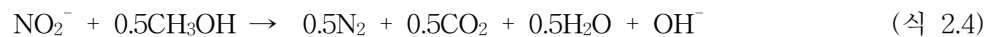
변화시키고 그것으로 질소의 순환이 이루어진다.

질소가 질산으로 생물학적으로 전환되는 호기적인 반응을 질산화과정이라 한다. 중요한 관여 미생물에는 *Nitrobacteraceae*가 있다. 독립영양세균은 탄소원으로 이산화탄소를 이용하고 암모니아의 산화과정을 통해 에너지를 얻는다. 암모니아가 질산으로 산화되는 과정은 두 단계를 거친다.



암모니아 약취 물질의 미생물에 의한 분해 기작은 *Nitrosomonas*에 의해 NO_2^- 의 형태로 산화되며 *Nitrobacter*에 의해 NO_3^- 까지 산화된다.

탈질 미생물들은 종속영양 미생물로서 유기물을 전자 공여체로 이용하여 다음과 같은 단계를 거쳐 최종 전자 수용체를 N_2 가스 형태로 환원시켜 대기 중으로 방출함으로써 질소를 제거한다.



탈질은 질산화와 달리 몇몇 특정한 미생물에 의해 단계적으로 진행되는 것이 아니고 일반적으로 여러 종속 영양 미생물들의 유기물 대사와 관련되어 이루어진다.

2. 황화수소 제거 메커니즘

환원된 황화합물에서 유기, 무기 영양적으로 자랄 수 있는 다양한 미생물 그룹들이 지구상에 존재하는데 이러한 황산화 세균들은 황성분을 산화하여 성장에 필요한 에너지를 얻는다. 대표적인 세균은 *Thiobacillus species*에 속한 균들이다. 이것들은 다양한 황화합물을 기질로 사용하고 넓은 pH, 온도 범위에서 성장한다. 황산화 세균이 황화합물을 기질로 사용하는 반응식은 다음과 같다.



이러한 반응에 대해 생각할 것이 있다. 이것은 황화수소가 황산화 미생물에 의해 SO_4^{2-} 로 분해된 후 자연에 유출이 된다면 H_2SO_4 를 생성하여 pH를 낮추고 환경에 나쁜 영향을 끼칠 수도 있다는 것이다.

제 4 절 포말 형성 메커니즘

포말은 형태학적으로 구와 다면체로 나누어 볼 수 있으며 다면체 형태를 일반적으로 포말이라 하지만 모양과 부피가 다양하기 때문에 이상적인 형태와는 거리가 멀다 (Myers, 1991).

포말 형성 기작은 화학적인 형성과 기계적인 형성으로 나누어 볼 수 있다. 화학적인 형성은 과도한 이산화탄소의 발생에 의한 분산으로 이루어진다. 기계적인 포말은 용액에 가스를 불어넣어줌으로써 포말을 형성하는 것이다 (Myers, 1991).

생성된 포말은 시간이 경과됨에 따라 붕괴된다. 붕괴 메커니즘은 크게 3가지로 나뉘어 볼 수 있다. 크기가 작고 내부 압력이 높은 포말로부터 크기가 크고 작은 내부압력을 가진 포말로의 가스 확산, lamellar film의 붕괴에 의한 포말의 합체, 중력에 의한 액체의 수력학적 배수이다. 좀 더 자세히 살펴보면 lamellar film의 곡률반경이 plateau border에서 작기 때문에 내부와 외부의 압력이 차이가 생기며 모세관 흡입에 의해 액체가 plateau border로 흐르게 된다. 이러한 현상에 의해 film은 더욱더 얇아지고 붕괴는 가속화된다. 또한 plateau border로 흐른 액체는 중력에 의한 수직액체이동에 의해 배수되며 film이 임계두께로 얇아지면 압력을 유지할 수 없게 되면서 포말이 깨진다 (Myers, 1991).

제 5 절 포말성분 및 첨가제

1. 포말성분

Keratin 가수분해물질은 두꺼운 포말을 형성시키는 주요 포말 형성 물질로써 30개의 polypeptides로 이루어져 있으며 주요 구성성분은 글루탐산, 알기닌, 시스틴 등의 아미노산이며, 그 중에서도 시스틴의 함유량이 7~20%로 가장 많다. 또한 많은 양의 시스틴을 함유하고 있기 때문에 분자내 disulfide 결합과 분자간 disulfide 결합을 형성하면서 3차원으로 결합된 강한 섬유질을 형성한다 (Tanabe et al., 2004). 단백질의 2가지 중요한 기능적 특징이 있는데 그것은 포말형성능력과 포말안정성이다. 포말형성능력은 포말의 부피를 크게 하는 능력으로 단백질을 가스와 액체계면에 빠르게 흡착시켜 표면장력을 낮추는 역할을 한다. 포말안정성은 포말이 깨지지 않고 계속해서 유지되는 능력으로 신축성이 있으나 고정된 흡착층의 형성과 관련된다 (Sarker et al., 1996).

2. 포말안정성 향상을 위한 첨가제

포말의 안정성을 향상시키기 위해서 여러 가지 첨가제를 사용한다. 첨가제로는 점성제, 생계면활성제, 철염 등을 고려하였다. 점성제로는 ethylene glycol을 사용하며 이것은 비이온성 고분자로써 많은 양의 단백질을 모으는 역할을 하여 포말이 팽창되는 동안 계면에 빠르게 단백질을 보충하여 표면장력을 강화시키는 역할을 한다. 또한 점성을 증가시켜 포말의 안정성을 높이는 역할을 한다 (Lu et al., 2005).

표면장력을 낮춰 부피를 팽창시키기 위해 계면활성제가 사용되는데 (Holmberg, 1998) 본 연구에서는 생계면활성제인 saponin을 사용하였다. Saponin은 식물에서 분비되는 계면활성제로 미생물의 생장과 환경에 악영향을 미치지 않는다. Saponin은 sugar의 친수성부분과 소수성의 다환체로 이루어진 glycosides로써 포말의 부피를 상당히 증가시키는 것으로 알려져 있다 (Dekker, 1987).

금속염은 포말의 안정성에 커다란 영향을 미친다. 금속의 양이온은 단백질의 음이온 전하를 가진 작용기와 작용하여 가교결합을 형성한다. 이것은 단백질간의

결합을 강화시키는 역할을 한다 (Duan and Gregory, 2003; 丹保憲仁, 1995). 다원 자가의 양이온은 흡착된 층의 포말 신축성 증가, 두꺼운 포말 형성, 포말의 붕괴 방지 등에 관여하는 다기능 물질로써 작용하여 포말의 안정성을 향상 시킨다 (Sarker et al., 1996; Sagis et al., 2001).

제 7 장 참고문헌

1. Abbasi, M. K. and Adams, W. A., (2000) "Gaseous N emission during simultaneous nitrification-denitrification associated with mineral N fertilization to a grassland soil under field conditions", *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 1251~1259.
2. Allegrini, I., De Santis, F., Di Palo, V., Febo, A., Perrino, C. and Possanzini, M., (1987) "Annular denuder method for sampling reactive gases and aerosols in the atmosphere", *The Science of the Total Environment*, 67, 1~16.
3. Anderson, G. A., Smith, R. J., Bundy, D. S., and Hammond, E. G., (1987) "Model to predict gaseous contaminants in swine confinement buildings", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 37, 235~253.
4. Angarska, J. K., Tachev, K. D., Kralchevsky, P. A., Mehreteab, A. and Broze, G., (1998) "Effects of counterions and co-ions on the drainage and stability of liquid films and foams", *Journal of Colloids and Interface Science*, 200, 31~45.
5. Argon National Laboratory (<http://www.anl.gov>). Foams accelerate remediation of NAPL-contaminated soil and groundwater.
6. Bari, A., Ferraro, V., Wilson, L. R. and Luttinger, D., (2003) "Measurements of gaseous HONO, HNO₃, SO₂, HCl, NH₃, particulate sulfate and PM_{2.5} in New York, NY", *Atmospheric Environment*, 37, 2825~2835.
7. Battye, R.; Battye, W.; Overcash, C.; Fudge, S. *Development and Selection of Ammonia Emission Factors*; EPA/600/R-94/190; U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development: Washington, DC, 1994.
8. Bitton, G., (1994) *Wastewater microbiology*, New York, Wiley-Liss. Inc.

9. Bourque, D., Bisailon, J., Beaudet, R., Sylvestre, M., Ishaque, M. and Morin, A., (1987) "Microbiological degradation of malodorous substances of swine waste under aerobic conditions", *Applied and Environmental Microbiology*, 53(1), 137~141.
10. Buijsman, E., Maas, H. F. M. and Asman, W. A. H., (1987) "Anthropogenic NH₃ emissions in europe", *Atmospheric Environment*, 21, 1009~1022.
11. Burgess, J.E., S.A. Parson, and R.M. Stuetz. 2001. Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review. *Biotechnology Advances*. 19: 35-63.
12. Castellanos, I. J., Crespo, R. and Griebenow, K., (2003) "Poly(ethylene glycol) as stabilizer and emulsifying agent: A novel stabilization approach preventing aggregation and inactivation of proteins upon encapsulation in bioerodible polyester microsphere", *Journal of Controlled Release*, 88, 135~145.
13. Chadwick, D. R., (2005) "Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from cattle manure heaps: effect of compaction and covering", *Atmospheric Environment*, 39, 787~799.
14. Chen, Y. S., Yin, J. and Wang, K., (2004) "Long-term operation of biofilters for biological removal of ammonia", *Chemosphere*, 58(8), 1023~1030.
15. Chowdiah, P., Misra, B. R., Kilbane II, J. J., Srivastava, V. J. and Hayes, T. D., (1998) "Foam propagation through soils for enhanced *in situ* remediation", *Journal of Hazardous Materials*, 62, 265~280.
16. Chung, Y. C., Huang, C. and Tseng, C. P., (2001) "Biological elimination of H₂S and NH₃ from wastegases by biofilter packed with immobilized heterotrophic bacteria", *Chemosphere*, 43, 1043~1050.
17. Clarkson, J. R., Cui, Z. F. and Darton, R. C., (1999) " Protein denaturation in foam", *Journal of Colloid and Interface Science*, 215, 323~332.
18. Duan, J. and Gregory, J., (2003) "Coagulation by hydrolysing metal salts", *Advances in Colloid and Interface Science*, 100~102, 475~502.

19. Durand, M. and Scott, B. J., (2005) "Geothermal ground gas emissions and indoor air pollution in Rotorua, New Zealand", *The Science of the total environment*, 345, 69~80.
20. Duarte, I. and Banhart, J., (2000) "A study of aluminium foam formation-kinetics and microstructure", *Acta Materialia*, 48, 2349~2362.
21. Figueredo, R. C. R. and Sabadini, E., (2003) "Firefighting foam stability: the effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, 215, 78~86.
22. Friedrich, J. and Kern, S., (2003) "Hydrolysis of native proteins by keratinolytic protease of *Doratomyces microsporus*", *Journal of molecular catalysis B: Enzymatic*, 21, 35~37.
23. Gautam, P. S. and Mohanty, K. K., "Novel aqueous foams for suppressing VOC emission", *Environmental Science and Technology*, 38, 2721~2728(2004)
24. Gautam, P. S. and Mohanty, K. K., "Mass transfer of volatile organic carbons through aqueous foams", *Journal of Colloid and Interface Science*, 273, 611~625(2004)
25. Graham, D. E. and Phillips, M. C., (1979) "Protein at liquid interfaces", *Journal of Colloid and Interface Science*, 70(3), 427~439.
26. Guy, P. A. and Anderegg, R. J., (1999) "Metal-ion binding and limited proteolysis of betabellin 15D, a designed beta-sandwich protein", *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 10, 969~974.
27. Harrison, A. B., Ripley, M. B., Dart, R. K., Betts, W. B. and Wilson, A. J., "Effect of protein hydrolysates on the degradation of diesel fuel in soil", *Enzyme and Microbial Technology*, 26, 388~393(2000)
28. Haztinger, P. 2001. Final Report: Enhanced *in situ* extraction of heavy metals using surfactant foams. National Center for Environmental Research, US Environmental Protection Agency.

29. Hibiya, K., Terada, A., Tsuneda, S. and Hirata, A., (2003) "Simultaneous nitrification and denitrification by controlling vertical and horizontal microenvironment in a membrane-aerated biofilm reactor", *Journal of Biotechnology*, 100, 23~32.
30. Holmberg, K., (1998) Novel surfactants, New York, Marcel Dekker, Inc.
31. Holman, J. B. and Wareham, D. G.,(2005) "COD, ammonia and dissolved oxygen time profiles in the simultaneous nitrification/denitrification process", *Biochemical Engineering Journal*, 22, 125~133.
32. Hussain, I., Ismail, A. M. and Cheeke, P. R., (1996) "Effects of feeding *Yucca schidigera* extract in diets varying in crude protein and urea contents on growth performance and cecum and blood urea and ammonia concentrations of rabbits, *Animal Feed Science Technology*, 62, 121~129.
33. Husted, S., Jenson, L. S. and Jorgensen, S. S., (1991) "Reducing ammonia loss from cattle slurry by the use of acidifying additives: The role of the buffer system", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 57, 335~349.
34. Kanani, T. A., Akochi, E., MacKenzie, A. F., Alli, I. and Barrington, S., (1992) "Organic and inorganic amendments to reduce ammonia losses from liquid hog manure", *Journal of Environmental Quality*, 21, 709~715.
35. Kim, C.; Lee, J.; Kim, D.; Nam, S.; Nam, Y. Application of biofilter for removing malodorous gas generated from compost factory. *J. Korea Soil Environ. Soc.* 1999, 4 (3), 45-56
36. Lacey, R. E., Mukhtar, S., Carey, J. B. and Ullman, J. L., (2004) "A review of literature concerning odors, ammonia, and dust from broiler production facilities: 1. Odor concentrations and emissions", *Journal of Applied Poultry Research*, 13, 500~504.
37. Leslie M. K., Tanja C. and Jennifer T., A Redefinition of Odor Mixture Quality, *Behavioral Neuroscience, Volume 119, Issue 3, June 2005, Pages 726-733*

38. Liao, C. M., (1996) "Model to predict human and pig exposure to gaseous contaminants emitted from stored manure", *Applied Mathematical Modelling*, 20, 731~740.
39. Lu, J. J., Yu, L. M. Y., Cheung, W. W. Y., Goldthorpe, I. A., Zuo, Y. Y., Policova, Z., Cox, P. N. and Neumann, A. W., (2005) "Poly(ethylene glycol) (PEG) enhances dynamic surface activity of a bovine lipid extract surfactants (BLES)", *Colloids and Surfaces B : Biointerfaces*, 41, 145~151.
40. Machino, A., Uchida, I., Matsunoby, K. and Yoshimori, T., (1997) "Development of a gas detector tube to measure dimethylsulfide in city gas based on liquefied natural gas", *Bunseki Kagaku*, 46(11), 869~874.
41. Mannebeck, H. In *Odour Prevention and Control of Organic Sludge and Livestock Control* Nielson, V. V., Voorburg, J. H., L'Hermite, P., Eds.; Elsevier Applied Science Publishers: London, 1986; pp 188-193.
42. Marinova, K. G., Gurkov, T. D., Velev, O. D., Ivanov, I. B., Campbell, B. and Borwankar, R. P., (1997) "The role of additives for the behaviour of thin emulsion films stabilized by proteins", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 123, 155~167.
43. McCrory, D. F. and Hobbs, P. J., "Additives to reduce ammonia and odor emissions from livestock wastes", *Journal of Environmental Quality*, 30, 345~355(2001)
44. Mills, B., (1995) "Review of methods of odour control", *Filtration and Separation*, 78(2), 147~152.
45. Misselbrook, T. H., Nicholson, F. A., Chambers, B. J. and Johnson, R. A., (2005) "Measuring ammonia emissions from land applied manure: An intercomparison of commonly used samplers and techniques", *Environmental Pollution*, 135, 389~397.
46. Mobley, H. L. T., Island, M. D. and Hausinger, R. P., (1995) "Molecular biology of microbial ureases", *Microbiological Reviews*, 59(3), 451~480.

47. Moor, P. A., Daniel, T. C., Edwards, D. R. and Miller, D. M., (1995) "Effect of chemical amendments on ammonia volatilization from poultry litter", *Journal of Environmental Quality*, 24, 293~300.
48. Moor, P. A., Daniel, T. C., Edwards, D. R. and Miller, D. M., "Evaluation of chemical amendments to reduce ammonia volatilization from poultry litter", *Poultry Science*, 75, 315~320(1996)
49. Mosquera, J., Monteny, G. J. and Erisman, J. W., (2005) "Overview and assessment of techniques to measure ammonia emissions from animal houses: The case of the Netherlands", *Environmental Pollution*, 135, 381~388.
50. Muehling, A. J., (1970) "Gases and odors from stored swine wastes", *Journal of Animal Science*, 30, 526~531.
51. Myers, D., (1991) *Surfaces, interfaces, and colloids: Principles and applications*, New York, VCH Publishers, Inc.
52. National Research Council. *Air Emissions from Animal Feeding Operations* The National Academic Press: Washington, DC, 2003.
53. Nguyen Quoc, P., Zitha, P. L. J. and Currie, P. K., (2002) " Effect of foam films on gas diffusion", *Journal of Colloid and Interface Science*, 248, 467~476.
54. Pahl, O., Williams, A. G. and Sneath, R. W., "Reduction of ammonia and odour emissions from pig slurry under slats using oil and foam layers", *Environmental Technology*, 23, 395~403(2002)
55. Perrino, C. and Gherardi, M., "Optimizing of the coating layer for the measurement of ammonia by diffusion denuders", *Atmospheric Environment*, 33, 4579~4587(1999)
56. Phillips, V. R., Lee, D. S., Scholtens, R., Garland, J. A. and Sneath, R. W., (2001) "A review of methods for measuring emission rates of ammonia from livestock buildings and slurry or manure stores, part 2: Monitoring flux rates, concentrations and airflow rates", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(1), 1~14.
57. Powers, W., (2002) " Emerging air quality issues and the impact on

animal agriculture: management and nutritional strategies", *Proceedings of the Maryland Nutrition Conference*, Timonium, Maryland.

58. Powers, W. J., Van Horn, H. H., Wilkie, C. J. and Nordstedt, R. A., (1999) "Effects of anaerobic digestion and additives to effluent or cattle feed on odors and odorant concentrations", *Journal of Animal Science*, 77 (6), 1412~1421.

59. Ripley, M.B., A.B. Harrison, W. Bernard Betts, R. Kinsey Dart, and A.J. Wilson. 2000. Enhanced degradation of a model oil compound in soil using a liquid foam-microbe formulation. *Environmental Science & Technology*. 34: 489-496.

60. Sagis, L. M. C., Groot-Mostert, A. E. A., Prins, A. and Linden, E., (2001) "Effect of copper ions on the drainage stability of foams prepared from egg white", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 180, 163~172.

61. Sarker, D. K., Wilde, P. J. and Clark, D. C., (1996) "Enhancement of the stability of protein-based food foams using trivalent cations", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 114, 227~236.

62. Schiffman, S. S., Bennett, J. L. and Raymer, J. H., (2001) "Quantification of odors and odorants from swine operations in North Carolina", *Agricultural and Forest Meteorology*, 108, 213~240.

63. Sita Ram Sarma, D. S. H., Pandit, J. and Khilar, K. C. (1988) "Enhancement of stability of aqueous foams by addition of water-soluble polymers-measurements and analysis", *Journal of Colloid and Interface Science*, 124(1), 339~348.

64. Sliwinski, B. J., Soliva, C. R., Machmuller, A. and Kreuzer, M., (2002) "Efficacy of plant extracts rich in secondary constituents to modify rumen fermentation", *Animal Feed Science and Technology*, 101, 101~114.

65. Sommer, S. G., Cheristensen, B. T., Nielsen, N. E. and Schjorring, J. K., (1993) "Ammonia volatilization during storage of cattle pig slurry: Effect of surface cover", *Journal of Agricultural Science*, 121, 63~71.

66. Sridhar Rao, R., Raja Babu, K. K. and Gupta, P. D., (1996) "Keratins and skin disorders", *Cell Biology International*, 20(4), 261~274.
67. *Surfaces, Interfaces, and Colloids: Principles and Applications* Myers, D., Eds.; VCH Publishers: New York, 1991; pp 251-270.
68. Tafreshi, A. M. and Marzo, M., (1999) "Foams and gels as fire protection agents", *Fire Safety Journal*, 33, 295~305.
69. Tanabe, T., Okitsu, N. and Yamauchi, K., (2004) "Fabrication and characterization of chemically crosslinked keratin films", *Materials Science and Engineering C* 24, 441~446.
70. Tanabe, T., Okitsu, N., Tachibana, A. and Yamauchi, K., (2002) "Preparation and characterization of keratin-chitosan composite film", *Biomaterials*, 23, 817~825.
71. Ullman, J. L., Mukhtar, S., Lacey, R. E., Carey, J. B., (2004) "A review of literature concerning odors, ammonia, and dust from broiler production facilities : 4. Remedial management practices", *Journal of Applied Poultry Research*, 13, 521~529.
72. U.S. EPA, "Determination of reactive acidic and basic gases and storing acidity of atmospheric fine particles (< 2.5 μm)", Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air, EPA/625/R-96/010a. (1999)
73. Varel, V. H., (1997) "Use of urease inhibitors to control nitrogen loss from livestock waste", *Bioresource Technology*, 62, 11~17.
74. Varel, V. H., Nienaber, J. A. and Freetly, H. C., (1999) "Conservation of nitrogen in cattle feedlot waste with urease inhibitors", *Journal of Animal Science*, 77, 1162~1168.
75. Vranken, E., Claes, S., Hendriks, J., Darius, P. and Berckmans, D., (2004) "Intermittent measurements to determine ammonia emissions from livestock buildings", *Biosystems Engineering*, 88(3), 351~358.

76. Wallace, R. J., Arthaud, L. and Newbold, C. J., (1994) "Influence of *Yucca shidigera* extract on ruminal ammonia concentrations and ruminal microorganisms, *Applied and Environmental Microbiology*, 60(6), 1762~1767.
77. Wang, Z. and Narsimhan, G., (2004) "Evolution of liquid holdup profile in a standing protein stabilized foam", *Journal of Colloid and Interface Science*, 280, 224~233.
78. Webb, J., Menzi, J., Pain, B. F., Misselbrook, T. H., Dammgen, U., Hendriks, H. and Dohler, H., (2005) "Managing ammonia emissions from livestock production in Europe", *Environmental Pollution*, 135, 399~406.
79. Wegner, C. and Hamburger, M., (2002) "Occurrence of stable foam in the upper Rhine river caused by plant-derived surfactants", *Environmental Science & Technology*, 36, 3250~3256.
80. Yang, Q., Zhu, P., Wu, X. and Huang, S., (2000) "Properties of concrete with a new type of saponin air-entraining agent", *Cement and Concrete Research*, 30, 1313~1317.
81. Yasuhara, A., (1980) "Relation between odor and odorous components in solid swine manure", *Chemosphere*, 9, 587~592.
82. Zhu, H. and Damodaran, S., (1994) "Effects of calcium and magnesium ions on aggregation of whey protein isolate and its effect on foaming properties", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42, 856~862.
83. Zhu, J. 2000. A review of microbiology in swine manure odor control. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 78: 93-106.
84. 김선희, 김승곤, 김영권, 김영자, 김충환, 김태운, 이건설, 정경석, 최양순, (2000) 미생물학 실험, 고려의학.
85. 김철호, (1994) "축산분뇨의 발생현황과 처리방안", 유기성폐기물자원화학회지, 2(1), 31~40.
86. 김창홍, 윤창노, 한호규, 정옥상, 이동희, 김성진, (2001) 화학대사전, 세화.
87. 남궁완. 1997. 생물탈취상을 이용한 매립가스 악취처리. 연구용역보고서. (주)삼성물산.

88. 농림부, “돈사에서 발생하는 악취 및 유해가스 제거 system 개발”, 최종연구보고서 (2000)
89. 농림부, “축사내 악취제거 및 부유세균 제거장치 개발”, 최종연구보고서 (2002)
90. 류희욱, 조경숙, 이태호, 허목, (2003) “양돈 시설 악취 관리: I. 국내 양돈 산업 현황 및 악취특성”, 한국냄새환경학회지, 2(2), 69~77.
91. 류희욱, 조경숙, 이태호, 허목, (2004) “양돈 시설 악취 관리: III. 악취 제어 기술”, 한국냄새환경학회지, 3(1), 1~11.
92. 박상진, 서정석, (2000) “목탄을 이용한 황화수소와 암모니아 악취 제거에 관한 연구”, 한국폐기물학회지, 17(3), 243~251.
93. 박재구, 임정렬, (1995) “계면활성제 수용액의 기포력 및 포말안정도에 관한 실험적 연구”, 한국자원공학회지, 32, 230~236.
94. 서성규, 정경훈, 전준민, (2003) “여수산단지역 황 화합물의 거동특성”, 한국냄새환경학회지, 2(2), 109~116.
95. 서정윤, (1992) “생물학적 필터에 의한 악취성 폐기가스중의 암모니아 제거에 관한 연구”, 대한환경공학회지, 14(1), 47~57.
96. 양성봉, (2002) “우리나라의 악취 규제제도”, 한국냄새환경학회지, 1(1), 6~15.
97. 이은영, (1999) 황 산화세균과 암모니아 산화세균의 분리와 황화계 및 암모니아 악취 제거의 특성, 공학박사학위 논문, 이화여자대학교 과학기술대학원.
98. 이태식, 박정흠, 이명숙, 허성호, (1990) “미생물에 의한 불휘발성아민의 분해”, 한국수산학회지, 23(1), 1~6.
99. 임정렬, 박재구, (1995) “계면활성제 수용액의 포말특성에 관한 고찰”, 한국자원공학회지, 32, 200~206.
100. 임정렬, 박재구, (1996) “기포액막의 두께 변화에 따른 표면탄성의 추정 및 포말안정도와의 상관성”, 한국자원공학회지, 33, 90~97.
101. 정종태, 이현철, 김진한. 2001. Entrapment와 Attachment에 의한 슬러지 고정화 기법들을 이용한 유해물질 처리 효율에 관한 비교연구. 대한환경공학회지. 23: 781-788.

102. 최정민, (2004) 고온 황화수소 및 중금속의 생물학적 제거에 관한 연구, 공학석사학위 논문, 이화여자대학교 과학기술대학원.
103. 최형송, 이인화. 2002. 돈사에서 발생하는 악취 및 유해가스 제거 system 개발. 농림기술개발연구과제 최종보고서. 농림부.
104. 환경부 대기보전국 (<http://www.me.go.kr>). 악취배출원관리제도.
105. 환경부, (2005) 악취방지법.
106. 허목, (2003) “악취방지기술과 평가”, 한국냄새환경학회지, 2(1), 1~13.
107. 丹保憲仁, 小笠原絃一, (1995) 上水處理, 동화기술.

주 의

1. 이 보고서는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.