

보안 과제( ), 일반 과제( O ) / 공개( O ), 비공개( ), 발간등록번호( O )  
가축질병대응기술개발사업 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-003207-01

# 매몰지로부터 오염물질 유출·확산 방지 기술 개발 최종보고서

2020. 7. 17.

주관연구기관 / (주)다산컨설턴트  
위탁연구기관 / 서울시립대학교  
위탁연구기관 / 한남대학교

농림축산식품부  
농림식품기술기획평가원

<제출문>

## 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “매물지로부터 오염물질 유출·확산 방지 기술 개발”(개발기간 : 2018. 04. 26~ 2019. 12. 31)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2020. 7. 17.

주관연구기관명 : (주)다산컨설팅트

(대표자) 이해경



참여기관명 : (주)다산컨설팅트

(대표자) 이해경



주관연구책임자 : 박 준 규

위탁연구책임자 : 김 계 훈

위탁연구책임자 : 김 건 하

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

<보고서 요약서>

보고서 요약서

과제고유번호	318043-2	해 당 단 계 연 구 기 간	2018.04.26. ~ 2019.12.31. (2년)	단 계 구 분	2/2
연구사업명	단 위 사 업	농식품기술개발사업			
	사 업 명	가축질병대응기술개발사업			
연구과제명	대 과 제 명				
	세부 과제명	매몰지로부터 오염물질 유출·확산 방지 기술 개발			
연구책임자	해당단계 참여연구원 수	총: 18 명 내부: 18 명 외부:    명	해당단계 연구개발비	정부: 200,000 천원 민간: 66,667 천원 계: 266,667 천원	
	총 연구기간 참여연구원 수	총: 18 명 내부: 18 명 외부:    명	총 연구개발비	정부: 350,000 천원 민간: 11,667 천원 계: 466,667 천원	
연구기관명 및 소속부서명	(주)다산컨설팅 기술연구소		참여기업명 (주)다산컨설팅		
국제공동연구	상대국명:		상대국 연구기관명:		
위탁연구	연구기관명: 서울시립대학교 한남대학교		연구책임자: 김계훈 교수 김건하 교수		
※ 국내외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반				

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 ·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호		2	1								

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

- 가축매몰지 침출수 유출 및 악취 발생 사례 조사
  - 기존 매몰지 환경피해 사례 조사
  - 침출수 유출 및 악취 발생 사례를 종합하여 기존 매몰방법 문제점 파악
  - 구제역·AI 긴급행동지침(SOP) 문제점 보완 방안 제시함
- 침출수 유출 및 악취 발생 방지가 가능한 매몰지 조성 방법 개발
  - 매몰지 조성시 유의 사항, 안전관리 및 악취 저감 방안 조사함
  - 생석회 대체물질을 조사하고 대체물질 소독제에 대하여 제시함
- 매몰용 유출차단용 피복비닐소재(비닐, 필름등) 개발
  - 차수재의 종류를 조사하고 현재사용되는 비닐과 HDPE재질의 차수재의 개선 방안을 도출함
    - 벤토나이트 혼합으로 차수재를 보강하여 시공하는 방안을 제시
- 매몰지 중 가축사체 매몰용 저장조의 표준규격설정
  - 현재 사용되고 있는 매몰의 저장조의 물리 화학적 특성을 조사함
  - 경제성을 고려한 매몰용 저장조의 규격을 구조해석을 통해 도출함
- 기존 불투수재료의 특성을 파악하고 이의 개선방안을 제시함
  - 각종 차수재를 비교 하고 폐기물 매립지 조성방법과 매몰지 조성방법을 비교 함
    - 회분식 흡착실험, 칼럼실험을 통하여 현장에 적용방안 도출
- 사축의 분해 조건을 조성하기 위한 매몰지 개선방안 도출
  - 매립지 조성공법을 고찰하여 사축분해 촉진을 위한 방안 제시
  - 매립지 조성공법을 고찰하여 매몰지 조성공법에 적용할 수 있는 요소 도출

보고서 면수

132

<요약문>

<p>연구의 목적 및 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 살처분 후 가축 매몰시 침출수 유출 및 악취 발생 등으로 인한 2차 환경피해가 발생하지 않도록 가축 매몰지를 조성하는 기술 개발</li> <li>• 가축사체 매몰용 저장조의 표준규격 확립</li> </ul>				
<p>연구개발성과</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지식재산권 : 특허출원·등록</li> <li>• 기술실시(이전) : 기술료</li> <li>• 사업화 : 제품화, 매출액, 고용창출</li> <li>• 학술성과 : 학술발표</li> <li>• 인력양성</li> </ul>				
<p>연구개발성과의 활용계획 (기대효과)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 종래 매몰지의 환경피해 영향 및 매몰방법의 문제점을 파악하여, 가축전염병(FMD, AI 등)에 의한 표준작업절차서(SOP)를 개선 가능</li> <li>• 본 연구를 통해 개발된 오염물질 차단막을 위한 생석회 대체소재, 침출수 유출 차단막을 개발하여 신개념 매몰지 설계, 조성 및 관리 기술로 가축전염병으로 문제가 예상되는 국내외로 수출 및 사업화가 가능</li> <li>• 주관기관과 위탁기관이 연계하여 개발하고자 하는 생석회 대체소재 및 침출수 유출 차단막 개발 기술은 최근 매몰지 유출에 따른 오염 문제가 심각해지고 있는 토양 및 지하수, 대기 분야에 바로 적용이 가능</li> <li>• 본 연구를 통해 가축사체 매몰용 저장조의 합리적인 표준규격을 확립하여 기성제품화로 인해 품질 및 성능이 일정하여 보다 안전한 매몰용 저장조를 생성 가능하며, 전처리(터파기)를 빠르게 실시할 수 있어, 위급시 빠른 대처가 가능</li> <li>• 또한, 침출수 유출 차단막 및 표준규격을 조달청에 등록 요청하여, 보다 안정적인 공급 및 품질 유지하여 보다 안전한 매몰지 조성이 가능</li> </ul>				
<p>국문핵심어 (5개 이내)</p>	<p>매몰지</p>	<p>침출수</p>	<p>악취</p>	<p>피복재</p>	<p>사후관리</p>
<p>영문핵심어 (5개 이내)</p>	<p>Burying site</p>	<p>Leachate</p>	<p>Odor</p>	<p>Covering material</p>	<p>Post management</p>

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

<본문목차>

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요 .....	8
2. 연구수행 내용 및 결과 .....	15
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 .....	125
4. 연구결과의 활용 계획 등 .....	127
붙임. 참고 문헌 .....	130

<별첨> 주관연구기관의 자체평가의견서

<뒷면지>

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 가축질병대응기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 가축질병대응기술 개발사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

# 1. 연구개발과제의 개요

## 1-1. 연구개발 목적

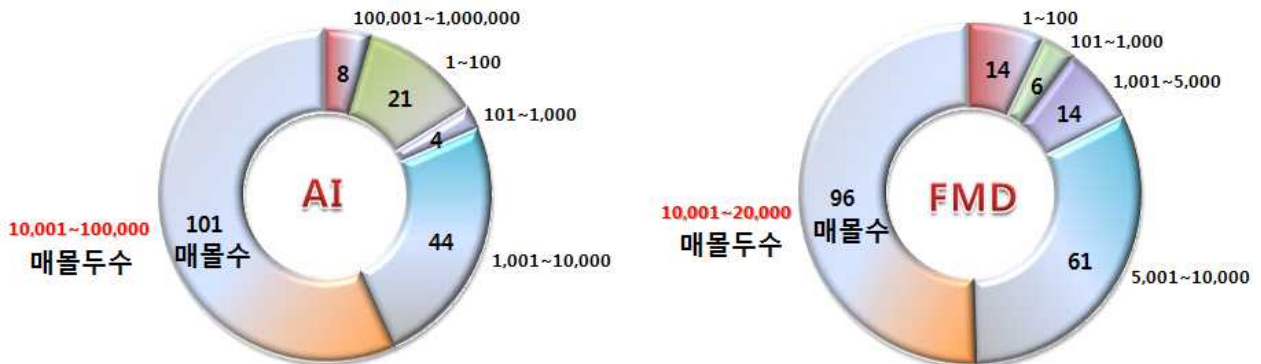
- 살처분 후 가축 매몰시 지하로 침출수 유출 및 악취 발생 등으로 인한 2차 환경피해가 발생하지 않도록 가축 매몰지를 조성하는 기술 개발
- 가축사체 매몰용 저장조의 표준규격 확립

## 1-2. 연구개발의 필요성

- 최근 구제역은 북미, 오세아니아 지역을 제외한 전 세계적으로 발생하고 있는 질환임. (Muroga, N., 2013)
- 구제역은 2005년 우리 주변국인 중국, 홍콩, 말레이시아, 몽골 및 러시아와 중남미 지역인 브라질, 콜롬비아에 발생되었고, 2006년에도 중국, 태국, 러시아, 터키, 아르헨티나 및 이집트 등에도 발생됨. 2007년에는 영국, 북한이 발생하였고, 중국, 베트남에도 발생하였음. (Beard, C.W., 2000)
- 우리나라 역시 구제역이 발생했던 국가임. 동북아시아에 위치하고 있는 우리나라는 3면이 둘러싸인 반도국인 동시에 북쪽은 비무장 지대에 의해 막혀있으므로 사실상 외국과 차단된 상태이므로 한국에서 발생한 구제역은 해외에서 유입된 것으로 추측됨. (Weaver, G.V., 2013)
- 우리나라에서는 1917년에 최초로 구제역이 발생했으며, 2010년 1월 경기도 포천과 연천 일대에서 발생한 구제역은 55농가, 5,900여 마리의 우제류를 살처분시키는 등 총 425억원의 피해를 입힌 후 81일 만에 종식이 선포되었음. 그러나 종식선언 18일 만에 구제역이 또 발생하여 전국적으로 살처분한 가축수가 302만 마리를 넘어서면서 방역 및 백신 대책에 든 비용만 1조 2,000억으로 추산되었음.
- 2010년 11월 경상북도에서 발생한 구제역은 급속도로 확산되었고, 이 구제역의 확산을 억제하기 위하여 농림축산식품부령의 '가축전염병예방법'에 가축 약 980만 마리가 살처분되어 매몰지 약 4,800여개소가 조성되었으며, 이러한 보상액은 약 2조 6,000억원 정도의 막대한 경제적 손실과 정신적 피해도 유발하였음. (농림축산식품부, 2011; 국립환경과학원, 2011; Yoon, H., 2013)
- 전국적으로 단기간에 발생된 가축전염병의 확산을 방지하기 위하여 감염된 가축들을 매몰하기 위하여 단기간에 많은 매몰지가 조성되면서 현장에서 매몰지 조성규정을 제대로 지키지 못한 상태로 매몰지가 조성된 곳이 많이 있었으며, 대규모로 조성하는 과정에서 피복소재가 훼손되거나 매몰지 관리기간 동안 부식 등으로 오염물질이 유출되는 경우도 발생하였음. (한국환경정책평가연구원, 2016)
- 특히, 매몰지 내 가축 사체는 수분이 70% 이상을 함유하고 있으며 부패성 유기물질이 다량으로 존재하기 때문에 매몰 후 부패 과정에서 침출되는 침출수와 대기 중으로 발생하는 악취와 같은 2차 환경피해가 발생할 가능성이 높으며, 최근 여러 논문 및 언론 기사를 통해 침출수가 유출된다는 보고가 상당수 발표되었음.
- 아래 그림은 가축전염병에 의해 형성되는 매몰지수 및 매몰두수가 나타나있으며, 최근

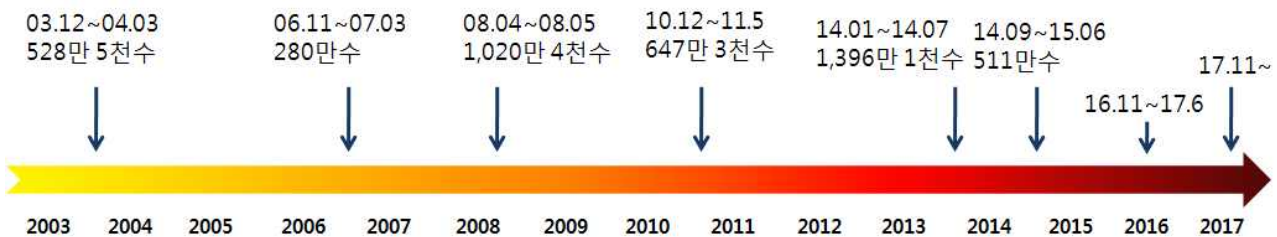


매물지 형성시 대형화 또는 매물두수가 높게 형성되는 추세임.



<그림 3> 최근 AI & FMD 매물지수 및 매물두수 (농림축산식품부, 2014~2016년)

- 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 입지 특성 및 현장 특성을 고려하여 가축매물지를 선정하고 오염을 최소화할 수 있도록 매물지의 구조를 개선하여 침출수 유출 등 오염물질 차폐를 효과적으로 수행할 수 있는 매물지의 설계, 조성 및 관리가 필요함.
- 구제역 또는 조류독감 등 가축 전염병의 발생이 예상되는 대규모 축산 단지 주변에 전염병이 발생하는 경우 등을 대비하여 차세대 매물지를 개발하여 이로 인한 환경 및 보건안정상의 문제를 최소화할 수 있는 기술 및 지침 마련이 선행되어야함.
- 기존 매물지의 환경/보건 안정성 향상을 위한 설계/조성/관리 방안 및 매물지 내부의 오염물질 유출방지를 위한 차폐구조 등 구제역 등으로 인한 설계/조성/관리 방안 및 매물지 내부의 오염물질 유출방지를 위한 차폐구조 등 구제역 등으로 인한 피해를 원천적으로 저감할 수 있는 새로운 개념의 매물지 구축/조성 기술이 필요함. (환경부, 2017)
- 아래 그림과 같이 1~2년의 주기로 창궐하였으나, 현재 토착병으로 인식될 정도로 AI 발생 주기가 짧으며, 이로 인해 매물 부지 선정, 축산농가의 경제적 손실 및 지역제한으로 인한 관광객의 감소로 인해 피해가 막심함.



<그림 4> AI 발생 주기 (농림축산식품부, 2003~2017 조사)

- 이에 기존 매물지에서 발생하는 침출수 및 악취 문제 등 때문에 대체 매물지로 플라스틱 저장조(FRP, HDPE) 매물 방식은 섬유강화플라스틱 재질의 저장조를 땅에 묻고 사체와 미생물 등을 넣은 후 입구를 밀봉하는 방법으로 빠른 매물처리가 가능하며 침출수 유출 우려가 없다는 이유로 플라스틱 저장조 매물 방식이 증가함. 최근 새롭게 조성하고 있는 FRP 저장조를 이용한 매물방식은 기존 매물방식 대비 빠른 매물처리가 가능하며 침출수

유출 우려가 없다고 알려져 <표 1>과 같이 2014년 이후 가장 많이 사용되고 있음.

- 또한, 대체 매몰지로 플라스틱 저장조(FRP, HDPE) 매몰 방식은 섬유강화플라스틱 재질의 저장조를 땅에 묻고 사체와 미생물 등을 넣은 후 입구를 밀봉하는 방법으로 빠른 매몰처리가 가능하며 침출수 유출 우려가 없다는 이유로 플라스틱 저장조 매몰 방식이 증가함.

<표 1> '14년 이후 조성된 가축 매몰지 조성방식별 현황 (농림수산식품부, 2018)

구분	소계	부	대	인	광	울	세	경	강	충	충	전	전	경	경	
		산	구	천	주	산	종	기	원	북	남	북	남	북	남	
매몰지수	1,268	4	2	7	4	5	11	306	30	169	183	280	220	17	30	
합계 조성 방식	FRP 저장조 등	716	3	0	7	2	5	0	185	4	114	147	205	14	13	17
	액비 저장조 등	31	0	0	0	0	0	1	12	0	18	0	0	0	0	0
	미생물매몰	352	0	0	0	2	0	10	25	21	34	28	39	190	0	3
	일반매몰	159	1	2	0	0	0	0	75	5	2	8	36	16	4	10
	일반+FRP 혼합	10	0	0	0	0	0	0	9	0	1	0	0	0	0	0

- 그러나 최근 FRP 저장조를 사용한 충남 천안에서 한파로 인해 파손되면서 침출수가 유출되는 사고가 발생하였고, 이는 FRP 저장조의 표준규격 설정이 되어 있지 않아 침출수 유출등 사용상 안전 우려가 있다는 지적이 지속적으로 제기되고 있음. (박완주 의원, 2018. 농민신문, 2018.03.02.)
- 이러한 문제점을 해결하기 위해 플라스틱 저장조의 적정 두께, 강도, 수밀성, 내구성 등의 저장조 파손방지를 위한 안전성 세부기준 설정 마련과 같은 가축 매몰로 인한 주변 환경에 2차 피해가 발생하지 않도록 하는 가축 매몰지 조성 기술 개발이 시급함.

### 1-3. 연구개발 범위

- 위탁연구기관(서울시립대학교 산학협력단)
  - 가축매몰지 침출수 유출 및 악취 발생 사례 조사
    - ✓ 기존 매몰지 환경피해 사례 조사
    - ✓ 침출수 유출 및 악취 발생 사례를 종합하여 기존 매몰방법 문제점 파악
    - ✓ 구제역·AI 긴급행동지침(SOP) 문제점 보완 방안 제시
  - 침출수 유출 및 악취 발생 방지가 가능한 매몰지 조성 방법 개발
    - ✓ 기존 매몰지 특성 파악
    - ✓ 생석회 사용에 따른 매몰지내 문제점 파악
    - ✓ 생석회 대체물질 파악 및 대체물질 사용효과 실험
    - ✓ 지하침출수 유출 및 악취 발생 우려가 적은 매몰지 조성방법 제시

- ✓ 생석회 대체물질 제시 및 사용기준 설정

- 주관연구기관((주)다산건설턴트)

- 매몰지 유출 차단용 피복소재(비닐, 필름 등) 개발
  - ✓ 기존 매몰지에 사용된 차단용 피복소재 조사
  - ✓ 기존 차단용 피복소재에 추가 피복소재 또는 대체 차단용 피복소재 조사
  - ✓ 침출수 유출 차단용 추가 피복소재 또는 대체 차단용 피복소재 Lab test 및 제시
  - ✓ 지하침출수 유출 차단용 추가 피복소재 또는 대체 차단용 피복소재 현장 실험
  - ✓ 지하침출수 유출 차단용 피복소재 확립
- 매몰지 중 가축사체 매몰용 저장조의 표준규격 설정
  - ✓ 기존 가축사체 매몰용 저장조의 특성 조사
  - ✓ 기존 가축사체 매몰용 저장조의 물리·화학적 특성 실험
  - ✓ 기존 가축사체 매몰용 저장조의 문제점 보완 사항 도출
  - ✓ 저장조의 적정 두께, 강도 및 수밀성 등을 고려한 안전한 저장조 세부기준 확립

- 위탁연구기관(한남대학교 산학협력단)

- 침출수의 누출방지 : 기존 불투수재료의 특성을 파악하고 이의 개선방안을 제시함
  - ✓ 기존 불투수재료의 특성제시
  - ✓ 현장조건에서 사용할 수 있는 토목재료(벤토나이트)의 포설방법 제시
  - ✓ SOP에 언급되어 있는 생석회 포설방법에 대한 검토
  - ✓ 화강풍화토-생석회-벤토나이트 및 불투수재료의 포설방법 제시
  - ✓ 투수실험(정수두, 변수두) 및 다짐시험 실시
- 사축의 분해 조건을 조성하기 위한 매몰지 개선방안 도출
  - ✓ 매몰지 내로 지하수가 침투되는 경우 이를 배제하기 위한 방법
  - ✓ 매몰지 침출수 재순환 등 기존 매립지공학에서 제시되고 있는 방안 검토

## 1-4. 연차별 연구 수행 내용

### 1차년도 연구수행 내용

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	연구개발 수행내용	연구결과
1차 년도 (2018)	가축매몰지 환경오염 사례조사 및 안전한 매몰지 조성방법 개발	가축매몰지 침출수 유출 및 악취 발생 사례 조사	- 기존 매몰지 환경피해 사례 조사 - 침출수 유출 및 악취 발생 사례를 종합하여 기존 매몰방법 문제점 파악	- 침출수 및 악취, 지하수 관리 기준 및 환경피해 현황 조사 - 가축 매몰지의 구조적 문제 및 관리 문제점 파악
		침출수 유출 및 악취 발생 방지가 가능한 매몰지 조 성 방법 개발	- 기존 매몰지 특성파악 - 생석회 사용에 따른 매몰지 내 문제점 파악 - 생석회 대체물질 파악	- 일반 매몰지 및 FRP 저장조의 조성 현황 조사 - 매몰지 조성시 유의 사항, 안전관리 및 악취 저감 방안 조사 - 생석회 사용에 관한 문제점 파악 및 대체물질 제시
	매몰지로부터 오염물질 유출·확산 방지 기술 개발	매몰용 유출차단용 피복비 닐소재(비닐, 필름등) 개발	- 기존 매몰지에 사용된 차단용 피복소재 조사 - 기존 차단용 피복소재에 추가 피복소재 또는 대체 차단용 피복소재 조사 - 침출수 유출 차단용 추가 피복소재 또는 대체 차단용 피복소재 Lab test 및 제시	- 매몰지에 사용된 차단용 피복소재 조사 - 차단용 피복소재 비교 및 대체 피복소재 선정 - 대체 차단용 피복소재 Lab test
		매몰지 중 가축사체 매몰 용 저장조의 표준규격설정	- 기존 가축사체 매몰용 저장조의 특성 조사 - 기존 가축사체 매몰용 저장조의 물리·화학적 특성 실험	- 기존매몰용 저장조 특성 및 문제점 조사 - 저장조 물리·화학적 특성 실험 - 물리적 특성을 바탕으로 구조해석

## 2차년도 연구수행 내용

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	연구개발 수행내용	연구결과
2차 년도 (2019)	가축매몰지 환경오염 사례조사 및 안전한 매몰지 조성방법 개발	가축매몰지 침출수 유출 및 악취 발생 사례 조사	- 기존 매몰지 환경피해 사례 조사 - 침출수 유출 및 악취 발생 사례를 종합하여 기존 매몰방법 문제점 파악 - 구제역·AI 긴급행동지침(SOP) 문제점 보완 방안 제시	- 침출수 및 악취, 지하수 관리 기준 및 환경피해 현황 조사 - 가축 매몰지의 구조적 문제 및 관리 문제점 파악 - 저장조의 규격문제, 차수재 문제, 대체 소독제 개발 필요
		침출수 유출 및 악취 발생 방지가 가능한 매몰지 조 성 방법 개발	- 기존 매몰지 특성과악 - 생석회 사용에 따른 매몰지 내 문제점 파악 - 생석회 대체물질 파악	- 일반 매몰지 및 FRP 저장조의 조성 현황 조사 - 매몰지 조성시 유의 사항, 안전관리 및 악취 저감 방안 조사 - 생석회 사용에 관한 문제점 파악 및 대체물질 제시
	매몰지로부터 오염물질 유출·확산 방지 기술 개발	매몰용 유출차단용 피복비 닐소재(비닐, 필름등) 개발	- 지하침출수 유출 차단용 추가 피복소재 또는 대체 차단용 피복소재 현장 실험 - 지하침출수 유출 차단용 피복소재 확립	- 비닐 차수재의 물성실험 - 벤토나이트 혼합으로 차수재 보강
		매몰지 중 가축사체 매몰 용 저장조의 표준규격설정	- 기존 가축사체 매몰용 저장조의 문제점 보완 사항 도출 - 저장조의 적정 두께, 강도 및 수밀성 등을 고려한 안전한 저장조 세부기준 확립	-매몰용 저장조 구조해석으로 최소단면 도출 -저장조 세부기준안 마련

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	연구개발 수행내용	연구결과
2차 년도 (2019)	가축매몰지의 침출수로 인한 2차 피해가 발생하지 않는 가축매몰지 조성기술 개발	기존 불투수재료의 특성을 파악하고 이의 개선방안을 제시함	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 불투수재료의 특성제시</li> <li>- 현장조건에서 사용할 수 있는 토목재료(벤토나이트)의 포설방법 제시</li> <li>- SOP에 언급되어 있는 생석회 포설방법에 대한 검토</li> <li>- 화강풍화토-생석회-벤토나이트 및 불투수재료의 포설방법 제시</li> <li>- 투수실험 및 다짐시험 실시</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 국내 매몰지 조성방법을 고찰하고 이의 문제점을 제시</li> <li>- 각종 차수재 비교</li> <li>- 폐기물매립지 조성방법과 매몰지 조성방법을 비교</li> <li>- 라이시미터 실험을 통하여 현장에 적용</li> <li>- 회분식 흡착실험, 칼럼 흡착실험을 통하여 현장포설방법에 대한 검토</li> <li>- 화강풍화토와 벤토나이트, 화강풍화토와 생석회 혼합비에 따른 투수계수, 다짐시험 실시</li> </ul>
		사축의 분해 조건을 조성하기 위한 매몰지 개선방안 도출	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 매몰지 내로 지하수가 침투되는 경우 이를 배제하기 위한 방법</li> <li>- 매몰지 침출수 재순환 등 기존 매립지공학에서 제시되고 있는 방안 검토</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 매립지 조성공법을 고찰하여 사축분해 축진을 위한 방안 제시</li> <li>- 매립지 조성공법을 고찰하여 매몰지조성 공법에 적용할 수 있는 요소 도출</li> </ul>

## 2. 연구수행 내용 및 결과

### 2-1. 가축매몰지 침출수 유출 및 악취 발생 사례 조사

#### 1) 기존 매몰지 환경피해 사례 조사

##### (1) 침출수 관리 기준 (가축매몰지역 환경조사지침, 2017.08)

< 1단계 : 매몰지 침출수 관리강화 단계 >

- ① 암모니아성질소가 10 mg/L 이상이면서, 염소이온이 100 mg/L 이상인 경우
- ② ①에 해당하지 않으나, 암모니아성질소가 2 mg/L 이상이면서, 염소이온이 25 mg/L 이상인 경우 중에서 전기전도도가 800  $\mu$ S/cm 이상이거나, 암모니아성질소와 염소이온의 곱이 1,000 mg/L 이상 되는 경우
- ③ ①,②에 해당하지 않으나, 암모니아성질소가 0.1mg/L 이상이면서 염소이온이 4.0mg/L 이상인 경우 중에서,  $\frac{\text{관측정 염소이온(mg/L)}}{\text{유공관 염소이온(mg/L)}}$ 의 값이 0.05 이상이면서 관측정의 전기전도도가 800  $\mu$ S/cm 이상
- ④ 3년 경과시점에서 암모니아성질소가 10mg/L 이상인 경우
- ⑤ 닐하이드린 (NRN, Ninhydrin) 농도가 1 mg/L 이상인 경우

< 2단계 : 매몰지 침출수 지속관찰 단계 >

- ① 1단계에 해당하지 않으나 암모니아성질소가 0.1 mg/L 이상이면서 염소이온이 4.0 mg/L 이상인 경우 중에서,  $\frac{\text{관측정 염소이온(mg/L)}}{\text{유공관 염소이온(mg/L)}}$ 의 값이 0.05 이상이면서 관측정의 염소이온이 15 mg/L 이상인 경우
- ② 유공관내 침출수가 발생하지 않거나 유공관이 없는 경우
- ③ 1단계에는 해당하지 않으나, 닐하이드린 (NRN, Ninhydrin) 농도가 0.5 mg/L 이상인 경우

< 3단계 : 매몰지 침출수 관리 현행유지 >

- ① 1, 2단계에 해당하지 않는 경우
- ② 1, 2단계에는 해당하지 않으나, 닐하이드린 (NRN, Ninhydrin) 농도가 0.5 mg/L 이하인 경우

##### (2) 가축 매몰지 침출수 현황

- ✓ 평택시, 천안시의 매몰지 관측정 5지점을 조사한 결과 4지점에서 암모니아성 질소 (3.0-87.6 mg/L)와 질산성 질소 (15.8-75.4 mg/L)가 높게 검출돼 침출수의 유출이 우려된다 (김계훈, 2010).
- ✓ 김해시 주촌면에 위치한 매몰지에서 침출수 유출이 발생함 (매경 이코노미, 2011).

- ✓ 파주시 매몰지 60곳 중 1단계와 2단계에 해당하는 매몰지는 없었으나, 3단계 (매몰지 침출수 관리 현행유지)에 해당하는 매몰지가 34곳으로 조사됨 (자유아시아방송, 2011).
- ✓ 보령시 천북면에 위치한 매몰지에서 폭우로 인한 침출수 유출이 발생함 (YTN, 2011).
- ✓ 괴산군 소수면, 원주시 지정면에 위치한 매몰지 2곳 모두에서 침출수가 유출됨 (한겨레, 2011).
- ✓ 포천시 매몰지 120곳을 조사한 결과 1곳에서 1단계 (매몰지 침출수 관리강화 단계)에 해당하는 결과가 측정됨 (자유아시아방송, 2011).
- ✓ 연천군 매몰지 16곳 중 1곳은 1단계 (매몰지 침출수 관리강화 단계)에 해당하였고, 2곳은 2단계 (매몰지 침출수 지속관찰 단계)에 해당함 (자유아시아방송, 2011).
- ✓ 음성군, 김해시, 예천군, 연기군, 청원군의 매몰지 관측정 75지점 중 12지점에서 침출수 유출이 우려되지만 침출수로 인한 것이 아님 (환경부, 2011).
- ✓ 강화군 외 31곳의 시·군에 위치한 매몰지 관측정 4799지점을 조사한 결과 71지점에서 침출수 유출 가능성이 높은 것으로 확인됨 (환경부, 2011).
- ✓ 전국 지자체에서 조사한 매몰지 관측정 1159지점 중 160지점에서 13.81%가 1단계 (매몰지 침출수 관리강화단계)와 2단계 (매몰지 침출수 지속관찰 단계)에 해당함 (환경부, 2011).
- ✓ 전국 매몰지 관측정 4799지점을 2012년에 재조사한 결과 13지점에서 침출수 유출 가능성이 높은 것으로 확인됨 (환경부, 2012).
- ✓ 경기도 이천시 매몰지 침출수를 조사한 결과 다흐이드린 (NRN, Ninhydrin) 농도가 2,984-4,179 mg/L으로 검출되어 1단계 (매몰지 침출수 관리강화 단계)에 해당함 (정소희, 2013).
- ✓ 양산시 상북면에 위치한 매몰지 관측정의 침출수를 측정한 결과 1단계 (매몰지 침출수 관리강화 단계)에 해당함 (양산신문, 2013).
- ✓ 경기도의 매몰지 2곳을 조사한 결과 암모니아성 질소가 715.4-1,100.0 mg/L, 염소이온이 256.0-736.0 mg/L, 다흐이드린 (NRN, Ninhydrin) 농도가 122.8-389.9 mg/L로 1단계 (매몰지 침출수 관리강화 단계)에 해당함 (김동우, 2014).
- ✓ 논산시 연산면 매몰지 관측정 6지점 중 4지점에서 암모니아성 질소가 0.523-0.88 mg/L, 총대장균군이 100-230으로 측정됨 (환경부, 2014).
- ✓ 영광군, 나주시, 영암군, 순천시, 천안시의 매몰지 6곳 중 4곳에서 암모니아성 질소가 고농도로 검출됨 (한국환경공단, 2014).
- ✓ 경기도 이천시와 안성시의 매몰지 관측정의 4지점의 침출수를 조사한 결과 암모니아성 질소가 최대 192.2 mg/L, 총대장균군이 32,000 CFU/100mL로 침출수 유출이 우려됨 (감사원, 2015).
- ✓ 안성시 일죽면 매몰지 관측정 10지점 중 4지점에서 암모니아성 질소를 조사한 결과 24.32-66.49 mg/L의 범위로 검출되어 1단계 (매몰지 침출수 관리강화 단계)에 해당됨



(환경부, 2012-2017).

- ✓ 천안시 매몰지 관측정 7지점 중 1지점에서 침출수 유출이 의심됨 (환경부, 2012-2017).
- ✓ 음성군 매몰지 관측정 9지점 중 1지점에서 암모니아성 질소가 최대 3,384 mg/L로 침출수가 유출됨 (환경부, 2012-2017).
- ✓ 원주시, 안성시, 해남군, 천안시, 나주시, 무안군, 음성군에 위치한 관측정 235지점 중 10지점에서 침출수 유출이 우려됨 (환경부, 2017).
- ✓ 전국 신규 조성 매몰지 관측정 443지점의 204지점을 조사한 결과 침출수 유출이 우려됨 (환경부, 2017).
- ✓ 천안시 봉양리, 안성시 장암리, 원주시 평창리의 매몰지에서 침출수 유출이 발생함 (연합뉴스 TV, 2017).
- ✓ 강원도 화천군의 매몰지에서 침출수 유출이 발생함 (강원도민일보, 2018).
- ✓ 연천군 가축 살처분 작업 중 대량의 핏물이 임진강 지류 하천으로 유입됨 (연합뉴스 TV, 2019)
- ✓ 매년 되풀이되는 구제역과 조류인플루엔자 발병 부지가 부족함에 따라 매몰지 확보에 어려움이 있음 (연합뉴스 TV, 2019)

### (3) 악취 관리 기준 및 현황 조사

- ✓ 악취 관리 기준 (악취방지법 시행규칙 별표 3, 환경부령 제 745호, 2018. 01. 18., 타법 개정)

#### ① 복합악취

구분	배출허용기준 (희석배수)	
	공업지역	기타 지역
배출구	1000 이하	500 이하
부지경계선	20 이하	15 이하

② 지정악취물질

구분	배출허용기준 (ppm)		적용시기
	공업지역	기타 지역	
암모니아	2 이하	1 이하	2005년 2월 10 부터
메틸메르캡탄	0.004 이하	0.002 이하	
황화수소	0.06 이하	0.02 이하	
다이메틸설파이드	0.05 이하	0.01 이하	
다이메틸다이설파이드	0.03 이하	0.009 이하	
트라이메틸아민	0.02 이하	0.005 이하	
아세트알데하이드	0.1 이하	0.05 이하	
스타이렌	0.8 이하	0.4 이하	
프로피온알데하이드	0.1 이하	0.05 이하	
뷰틸알데하이드	0.1 이하	0.029 이하	
n-발레르알데하이드	0.02 이하	0.009 이하	
i-발레르알데하이드	0.006 이하	0.003 이하	
톨루엔	30 이하	10 이하	2008년 1월 1일 부터
자일렌	2 이하	1 이하	
메틸에틸케톤	35 이하	13 이하	
메틸아이소뷰틸케톤	3 이하	1 이하	
뷰틸아세테이트	4 이하	1 이하	
프로피온산	0.07 이하	0.03 이하	2010년 1월 1일 부터
n-뷰틸산	0.002 이하	0.001 이하	
n-발레르산	0.002 이하	0.0009 이하	
i-발레르산	0.004 이하	0.001 이하	
i-뷰틸알코올	4.0 이하	0.9 이하	

(4) 가축 매몰지 악취 현황

- ✓ 이천시외의 매몰지 인근에 거주하는 주민으로부터 악취 발생 민원이 발생함 (환경부, 2015).
- ✓ 부여군 내산면의 매몰지 인근에 거주하는 주민으로부터 악취 발생 민원이 발생함 (충남보건환경연구원, 2018).
- ✓ 논산시 연산면의 매몰지 12지점 중 4지점에서 암모니아 0.297-11.171 ppm, 황화수소 0.001-0.002 ppm, 메틸메르캡탄 0.001 ppm, 다이메틸설파이드 0.001-0.003 ppm, 다이메틸다이설파이드 0.001-0.003 ppm의 범위로 기타지역 지정악취배출허용기준을 초과함 (환경부, 2017).

- ✓ 경기도 용인시와 이천시의 매몰지를 이설하는 과정에서 발생한 악취가 기타지역 지정악취 배출허용기준을 초과함 (환경부, 2017).
- ✓ 김포시 월곶면의 매몰지 인근 관정 내에서 악취가 발생함 (연합뉴스, 2011).
- ✓ 남양주시 여주군의 매몰지에서 침출수 제거 중 악취가 발생함 (한겨레, 2011).
- ✓ 연천군 백학면의 매몰지에서 악취 발생으로 인해 독수리 떼가 몰려듦 (중앙일보, 2011).
- ✓ 이천시 백사면, 안성시, 봉화군, 화천시, 안동시, 철원군 매몰지 인근에 거주하는 주민으로부터 악취 발생 민원이 발생함 (SBS 보도자료, 2011; 조선일보, 2011; 경향신문, 2011; 강원도뉴스, 2018).
- ✓ 전북 익산지역에서 매몰지에 매몰돼 있던 오리 사체를 소멸처리 작업 중 악취가 발생해 인근지역에서 민원이 발생함 (NEWSIS, 2018)
- ✓ 충청남도 부여군 농가에서 가축매몰지 잔존물 퇴비화 사업으로 반출된 가축사체를 불법으로 매립하면서 인근 지역에 극심한 악취 및 침출수가 발생함 (충청일보, 2019)

## (5) 지하수 관리 기준 및 현황 조사

- ✓ 가축 매몰지 지하수 관리 기준 (지하수의 수진보전 등에 관한 규칙 별 4, 환경부령 제 696호, 2017. 03. 29., 일부개정)

### 1. 지하수를 음용수로 이용하는 경우

< 먹는물 수질기준 적용 (먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙 별표 1, 환경부령 제 684호, 2016. 12. 30., 타법개정) >

- 일반세균은 1mL 중 100CFU (Colony Forming Unit)를 넘지 아니할 것.
- 총 대장균군은 100mL (샘물·먹는샘물, 염지하수·먹는염지하수 및 먹는해양심층수의 경우에는 250mL)에서 검출되지 아니할 것.
- 암모니아성 질소는 0.5mg/L를 넘지 아니할 것.
- 질산성 질소는 10mg/L를 넘지 아니할 것.

### 2. 지하수를 생활용수, 농·어업용수, 공업용수로 이용하는 경우

- ✓ 아래의 표에 일반오염물질, 특정유해물질의 기준을 아래표에 정리함

항목		이용목적별		
		생활용수	농·어업용수	공업용수
일반 오염 물질 (4개)	수소이온농도 (pH)	5.8 ~ 8.5	6.0 ~ 8.5	5.0 ~ 9.0
	총대장균군	5,000 이하 (균수/100mL)	-	-
	질산성질소	20 이하	20 이하	40 이하
특정 유해물질 (15개)	염소이온	250 이하	250 이하	500 이하
	카드뮴	0.01 이하	0.01 이하	0.02 이하
	비소	0.05 이하	0.05 이하	0.1 이하
	시안	0.01 이하	0.01 이하	0.2 이하
	수은	0.001 이하	0.001 이하	0.001 이하
	유기인	0.0005 이하	0.0005 이하	0.0005 이하
	페놀	0.005 이하	0.005 이하	0.01 이하
	납	0.1 이하	0.1 이하	0.2 이하
	6가크롬	0.05 이하	0.05 이하	0.1 이하
	트리클로로에틸렌	0.03 이하	0.03 이하	0.06 이하
	테트라클로로에틸렌	0.01 이하	0.01 이하	0.02 이하
	1.1.1-트리클로로에탄	0.15 이하	0.3 이하	0.5 이하
	벤젠	0.015 이하	-	-
	톨루엔	1 이하	-	-
	에틸벤젠	0.45 이하	-	-
크실렌	0.75 이하	-	-	

## (6) 가축 매몰지 지하수 현황

- ✓ 천안시 풍세면 인근 매몰지 4지점을 조사한 결과 4지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2007).
- ✓ 익산시 황등면, 익산시 함열읍, 김제시 공덕면, 김제시 백산명 인근 매몰지 6지점을 조사한 결과 6지점에서 질산성 질소가 11.744~57.423kg/L로 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2007).
- ✓ 전라북도 매몰지 인근 지하수 26지점을 조사한 결과 12지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2008).
- ✓ 전주청, 영산강청, 한강청, 금강청, 낙동강청, 원주청, 대구청 관리 하의 매몰지 인근 지하수 80지점을 조사한 결과 43지점에서 질산성 질소가 10.6~35.0kg/L로 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2008).

- ✓ 익산시 여산면과 용동면 매몰지 인근 지하수 2지점을 조사한 결과 2지점에서 질산성 질소가 각각 13.1, 22.6kg/L로 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2008).
- ✓ 충청남도 매몰지 인근 지하수 29지점을 조사한 결과 17지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (충남 보건 환경 연구원, 2009).
- ✓ 부산시, 울산시, 강원도, 경기도, 충청남도, 전라북도, 전라남도, 경상북도, 경상남도의 매몰지 인근 지하수 81지점을 조사한 결과 50지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2009).
- ✓ 전국의 매몰지 인근 지하수 474지점을 조사한 결과 122지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2009).
- ✓ 천안시의 매몰지 인근 지하수 3지점을 조사한 결과 1지점에서 암모니아성 질소가 28mg/L로 지하수 수질 기준을 초과함 (김계훈, 2010).
- ✓ 인천시 강화군 매몰지 인근 지하수 51지점을 조사한 결과 5지점에서 질산성 질소가 기준치를 초과하여 지하수 수질 기준을 초과함 (한겨레, 2011).
- ✓ 평택시 매몰지 인근 지하수 256지점을 조사한 결과 99지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (평택시민신문, 2011).
- ✓ 경상북도 매몰지 인근 지하수 44지점을 조사한 결과 14지점에서 질산성 질소가 기준치를 초과하여 지하수 수질 기준을 초과함 (SBS, 2011).
- ✓ 전국의 매몰지 인근 지하수 7930지점을 조사한 결과 1982지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2011).
- ✓ 전국 지자체 관리 하의 매몰지 인근 지하수 7679지점을 조사한 결과 2468지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2011).
- ✓ 전국의 매몰지 인근 지하수 7631지점을 조사한 결과 암모니아성 질소가 51지점에서 기준치를 초과하였고 질산성 질소가 1618지점에서 기준치를 초과하였으며 총 대장균군이 385지점에서 기준치를 초과하여 총 1937지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2012).
- ✓ 예산군 인근 지하수 60지점을 조사한 결과 19지점에서 질산성 질소와 총 대장균군이 부적합 판정을 받아 지하수 수질 기준을 초과함 (충남 보건 환경 연구원, 2013).
- ✓ 경기도 이천시 매몰지 인근 지하수 14지점을 조사한 결과 4지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2013).
- ✓ 강원도 매몰지 인근 지하수 55지점을 조사한 결과 15지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (허인량, 2014).
- ✓ 경기도 매몰지 인근 지하수 9지점을 조사한 결과 9지점에서 암모니아성 질소가 16.4~51.7mg/L로 지하수 수질 기준을 초과함 (김현구, 2014).
- ✓ 경기도 매몰지 인근 지하수 155지점을 조사한 결과 17지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (경기도 보건 환경 연구원, 2016).

- ✓ 안성시 일죽면 매몰지 인근 지하수 1지점을 조사한 결과 1지점에서 암모니아성 질소가 1.75mg/L, 질산성 질소가 104.57kg/L로 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2012~2017).
- ✓ 신규 조성 매몰지 인근 지하수 203지점을 조사한 결과 질산성 질소가 36지점에서 기준치를 초과하였고 총 대장균군이 12지점에서 기준치를 초과하여 총 49지점에서 지하수 수질 기준을 초과함 (환경부, 2017).
- ✓ 수도권 가축매몰지 92곳 관리실태 점검 결과, 매몰지 5곳에서 관리부실로인해 개선조치 요청됨 (인천일보, 2018)
- ✓ 군산시 축산농가에서 지자체에 신고하지 않고 무단으로 돼지 사체를 매몰하여 축산인근 토양 및 지하수 오염이 발생함(전북일보, 2020)

## 2) 침출수 유출 및 악취 발생 사례를 종합하여 기존 매몰방법 문제점 파악

가축 매몰지 환경 피해 사례를 조사하여 가축 매몰지 문제점을 아래 <표 1>에 정리함.

<표 3> 가축매몰지 문제점

<ul style="list-style-type: none"> <li>· 차수재 (비닐) 문제</li> <li>✓ 비닐 접합 부위로 침출수 유출</li> <li>✓ 생석회 발열로 인한 비닐 훼손</li> <li>✓ 시체 매몰이 아닌 생매장으로 인한 비닐 파손</li> <li>✓ 대규모 매몰지 조성시 사체 처리로 인한 비닐 훼손</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 관리문제</li> <li>✓ 경사면에 조성된 매몰지의 경우 침식 및 붕괴 우려</li> <li>✓ 매몰지 지반의 용기 및 침하 우려</li> <li>✓ 매몰지 배수 처리 미흡</li> <li>✓ 단기간 다수의 매몰지 조성시 매뉴얼 준수가 제대로 이뤄지지 않음</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>· FRP 문제</li> <li>✓ 저장조 매몰시 주변 토압에 따른 균열 및 파손</li> <li>✓ 저장조 바닥에 하중이 쏠려 파손 우려</li> <li>✓ 저장조 규격이 정해지지 않아 지방자치단체별 재질, 두께, 강도 등이 서로 다름 (표준 규격 부재)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 악취발생</li> <li>✓ 침출수 관정을 통해 악취 유출 가능</li> <li>✓ 매몰지의 붕괴로 침출수 유출 및 악취 발생 가능</li> <li>✓ FRP 저장조의 가스 배출구를 통한 악취 발생</li> <li>✓ 가축의 부패로 매몰지 조성 후 약 15일간 악취가 가장 심함</li> </ul>

### 3) 구제역·AI 긴급행동지침(SOP) 문제점 보완 방안 제시

#### (1) 긴급행동지침(SOP) 문제점

- ✓ 저장조의 표준 규격이 정해지지 않아 지방자치단체별 재질, 두께, 강도 등이 서로 상이함. 따라서 저장조의 균열 및 파손으로 인한 침출수 유출에 대한 우려가 있음.
- ✓ 살처분 사체의 처리요령 중 매몰방식의 경우 차수재에 대한 규격이 '0.2mm이상 비닐'로 정해져 있으나, 이 규격은 가축사체 매몰시 물리적인 충격 및 소독제로 사용되는 생석회의 발열반응에 의해 훼손의 우려가 있음.
- ✓ 가축사체의 매몰처리에 사용되는 소독제인 생석회는 물과 접촉 시 200℃ 가량의 열이 발생하므로, 침출수 유출을 막는 차수재를 훼손시킬 우려가 있으며, 생석회 사용으로 인한 작업자의 보건상의 문제가 우려됨.

#### (2) 긴급행동지침(SOP) 보완 방안

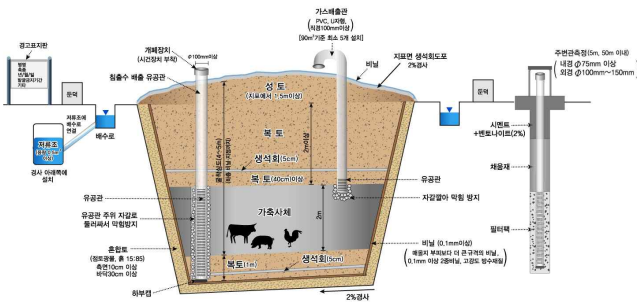
- ✓ 가축매몰용 저장조의 내한성, 내후성, 누수시험 등과 같은 물리·화학적 특성 실험을 통하여 규격(재질, 두께, 강도) 설정이 필요함.
- ✓ 가축 사체 매몰 시 발생하는 물리적인 충격에 의한 차수재(비닐)의 훼손을 막을 수 있는 피복소재 개발 및 규격 설정이 필요함.
- ✓ 가축 사체 매몰 시 소독제로 사용되는 생석회는 차수재 훼손 및 작업자의 건강보건 상의 문제에 대한 우려가 있으므로 대체 소독제 개발이 필요함.

## 2-2. 침출수 유출 및 악취 발생 방지가 가능한 매몰지 조성 방법 개발

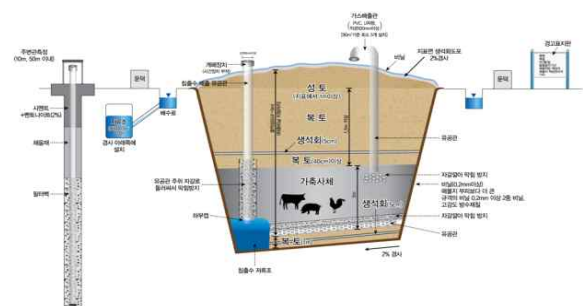
### 1) 기존 매몰지 특성 파악

#### (1)가축 매몰지 조성 방식별 현황

- ✓ 2010년부터 2011년 발생한 구제역 당시 가축전염병의 확산을 방지하기 위하여 살 처분된 다수의 가축 사체를 단기간에 매몰하다보니 대부분 일반 매몰에 의해 매몰지가 조성되었음.
- ✓ 그러나 그 과정에 매몰지 조성 현장에서 매뉴얼을 제대로 준수하지 못한 상태로 매몰지를 조성하거나 적합한 부지가 아닌 곳에도 매몰지를 조성한 사례가 많았으며, 매몰지 조성시 피복소재가 훼손되거나 사체 부패로 부식 되는 등으로 오염물질이 유출되는 경우도 발생하였음 (한국환경정책평가연구원, 2016).
- ✓ 그 이후 매몰지 조성방법은 침출수 발생 가능성을 낮추기 위해 아래 그림과 같이 피복 소재 및 침출수 저류조 등 일부 변경이 있었으나 기본적인 틀에는 큰 변화는 없었음.



<그림 5> 가축매몰지 환경관리지침  
(2010)(환경부, 2010a)



<그림 6> 구제역  
긴급행동지침(농림수산식품부, 2017)

- ✓ 이와 같은 일반 매몰지에서 발생하는 침출수 및 악취 문제 등 때문에 대체 매몰지인 플라스틱 저장조 (FRP, HDPE) 매몰 방식이 증가하였음. FRP 매몰 방식은 섬유강화플라스틱 재질의 저장조를 땅에 묻고 사체와 미생물 등을 넣은 후 입구를 밀봉하는 방법으로 빠른 매몰처리가 가능하며 침출수 유출 우려가 없다고 알려졌다.
- ✓ 이에 기존 매몰방식 대비 빠른 매몰처리가 가능하며 침출수 유출 우려가 없는 FRP 매몰 방식이 액비 대형 저장조, 랜더링, 미생물 처리 등과 같이 친환경적 매몰처분으로 분류가 되어 <표 3>와 같이 2014년 이후 가장 많이 사용되고 있고 일반 매몰은 친환경적 처리 방법으로 처리가 어려운 경우에 처리하도록 되어 2014년 이후 일반 매몰 비중이 10% 수준으로 낮아짐.



<표 3> '14년 이후 조성된 가축 매몰지 조성방식별 현황 (농림수산식품부, 2018)

합계	구분	소계	부	대	인	광	울	세	경	강	충	충	전	전	경	경
			산	구	천	주	산	종	기	원	북	남	북	남	북	남
	매몰지수	1,268	4	2	7	4	5	11	306	30	169	183	280	220	17	30
조 성 방 식	FRP 저장조 등	716	3	0	7	2	5	0	185	4	114	147	205	14	13	17
	액비 저장조 등	31	0	0	0	0	0	1	12	0	18	0	0	0	0	0
	미생물매몰	352	0	0	0	2	0	10	25	21	34	28	39	190	0	3
	일반매몰	159	1	2	0	0	0	0	75	5	2	8	36	16	4	10
	일반+FRP 혼합	10	0	0	0	0	0	0	9	0	1	0	0	0	0	0

- ✓ 친환경 매몰 방식인 FRP 매몰 방식은 침출수 유출 우려가 없기 때문에 일반 매몰지 선정에 기준이 되는 <표 4>과 관련없이 하천 주변에도 매몰이 이뤄질 수 있고, 하천 주변 축사에서 가축전염병이 발생할 경우 친환경매몰을 실시하도록 SOP에 명시됨.

<표 4> 매몰지 선정기준

적합한 매몰 장소	부적합한 매몰 장소
㉠ 하천·수원지, 도로 등과 30m 이상 떨어진 곳	㉠ 「수도법」 제7조에 따른 상수원보호구역
㉡ 매몰지 굴착과정에서 지하수가 나타나지 않는 곳(지하수위로부터 1m이상 이격)	㉡ 「환경정책기본법」 제22조에 따른 특별대책지역
㉢ 음용 지하수 관정과 75m 이상 떨어진 곳	㉢ 「한강수계 상수원수질개선 및 주민지원 등에 관한 법률」 제4조제1항, 「낙동강수계 물관리 및 주민지원 등에 관한 법률」 제4조제1항, 「금강수계 물관리 및 주민지원 등에 관한 법률」 제4조제1항 및 「영산강수계 물관리 및 주민지원 등에 관한 법률」 제4조제1항에 따른 수변구역
㉣ 도로 및 주민이 집단적으로 거주하는 지역에 인접하지 아니한 곳으로 사람이나 가축의 접근을 제한할 수 있는 곳	㉣ 「먹는물관리법」에 따른 염지하수관리구역 및 샘플 집수구역
㉤ 유실, 붕괴 등의 우려가 없는 평탄한 곳	㉤ 「지하수법」 제12조에 따른 지하수보전구역
㉥ 침수의 우려가 없는 곳	㉥ 그 밖에 이에 준하는 수질환경보전이 필요한 지역
㉦ 농장부지 등 매몰 대상가축이 발생한 곳으로서 매몰지 선정기준에 적합한 곳	
㉧ 국가 또는 지방단체 소유 공유지로서 매몰 후보지 선정기준에 적합한 곳	

## (2) FRP 매몰지 문제점

- ✓ FRP 매몰지는 침출수 유출 문제가 없는 안전한 매몰지로 알려져 있지만 현황 조사 결과, 매몰지 구조적 문제 및 한파와 같은 외부 환경으로 인해 FRP 저장조가 파손되어 침출수가 유출되는 사례가 조사됨.
- ✓ FRP 훼손은 FRP 저장조의 재질, 두께 등과 같은 세부 기준이 설정되지 않았으며, 성능테스트 역시 토압에 견디는 기준같은 세부 기준이 없이 대부분 방역관의 육안 검사로 파손되지 않으면 사용하는 것으로 파악됨. 특히, 다수의 살처분 가축사체가

발생해 보유해 놓은 저장조가 없을 경우 시중에 판매하는 플라스틱 저장조를 사용하기도 함.

- ✓ <그림 5~8>과 같이 다양한 형태의 저장조를 사용하고 있으며, 토압에 견디기 힘든 구조 (그림 5 좌)의 저장조를 사용하기도 하고, 일반 매물과 FRP 매물을 같이 처리하기도 함. 일반 매물의 가축사체들은 부패하면서 매물지의 구조 안정성이 낮아지기 때문에 주변에 매몰된 FRP 저장조에 영향을 미칠 수 있다고 판단됨.
- ✓ <그림 6>~<그림 7>과 같이 음성의 매물지는 저장조 대부분이 매몰되어 있어 구조적인 문제가 발생하지 않은 것으로 보이나 포시와 ㄴ시의 매물지는 절반이상이 노출되어 있는 형태로 매몰이 되었고, 지반 평탄화와 같은 기초적인 작업이 제대로 이뤄지지 않아 한쪽으로 기운 것을 확인 할 수 있었음.



<그림 5> FRP 및 HDPE 저장조 활용 사진 (좌: 뉴시스, 2017; 우: 양산뉴스파크, 2016)



<그림 6> FRP 저장조 현황 (오군)



<그림 7> FRP 저장조 현황 (포시)



<그림 8> FRP 저장조 현황 (L시)

- ✓ 이처럼 FRP 저장조를 매몰하는 방식에 있어서도 매뉴얼이 없이 현장여건에 따라 매몰이 이뤄지고 있어 구조적인 문제가 발생하기 쉽다고 판단되며, 이와 같은 이유로 안전한 친환경적 매몰지로 분류되는 FRP 매몰지의 파손 사례가 지속적으로 보고된다고 판단됨.
- ✓ FRP 저장조는 침출수 및 악취발생 우려가 적으나 부패과정에서 발생하는 가스를 배출하기 위한 가스관으로 악취가 발생할 가능성이 있어 일부 FRP 저장조는 발생하는 악취를 저감시키기 위하여 가스관에 활성탄을 설치하거나 탈취조를 따로 조성하지만, 대부분의 저장조는 활성탄 및 탈취조 설치의 필수가 아니기 때문에 악취 저감 장치가 없이 조성되어 악취 발생 가능성이 있음.
- ✓ FRP 저장조에 매몰된 가축이 분해되면서 발생하는 가스로 인하여 저장조 내의 압력이 증가하므로 저장조 파손을 막기 위해 가스 배출구를 밀폐하지 않거나 쉽게 분리가 가능한 가스 맨홀 뚜껑을 사용함. 이처럼 고정된 맨홀 뚜껑을 사용하지 않다보니 고온 및 압력에 의해 형태에 변형이 일어난 것을 현장조사에서 발견할 수 있었음 (그림 9). 이처럼 가스 배출구에 훼손이 일어나면 악취 발생이 가속화될 수 있으며, 빗물 등이 저장조로 유입될 수 있음.
- ✓ 이에 악취 발생이 가장 심한 가축매몰 초기에 악취 발생을 효율적으로 저감할 수 있으면서 매몰지 관리가 용이한 방안 마련이 필요하다고 판단됨.



<그림 9> FRP 저장조의 탈취조 및 가스 배출구 현황 (D시)

- ✓ 이처럼 다양한 형태의 FRP 및 HDPE 저장조가 활용되고 다양한 모습으로 매몰지 된 것은 현재 SOP 상에 표준 규격 및 상세한 매몰 방법 매뉴얼이 없기 때문임.
- ✓ FRP 저장조를 사용하는 하수도법 시행규칙 제55조(개인하수처리시설 제조제품의 구조 및 규격 등의 기준)에 따르면 다음과 같은 기준에 맞아야 사용할 수 있도록 되어 있음.

- 제품의 겉모양은 부분적 형태의 불규칙성, 비틀림, 균열, 흠, 변형 등의 결함이 없어야 한다.
- 유리섬유 함유량은 25% 이상이어야 한다.
- 한국산업규격(KS) F 4803(유리섬유강화플라스틱제 정화조 구성부품)의 제3호부터 제5호까지의 규정에 따른 품질기준 등에 맞아야 한다.
- 다음의 두께 기준에 맞아야 한다. 다만, 각형의 경우에는 높이와 환산지름[2×가로×세로/(가로+세로)] 중 큰 값을 기준으로 두께를 산정한다.

지름(mm)	두께(mm)
1,500 이하	7 이상
1,500 초과 1,700 이하	8 이상
1,700 초과 2,200 이하	9 이상
2,200 초과 2,700 이하	10 이상
2,700 초과 2,900 이하	11 이상
2,900 초과	12 이상

- ✓ 이에 FRP 저장조의 안전성을 확보하기 위해서는 재질 기준, 적정 두께·강도, 수밀성, 내구성 등과 같은 저장조 파손방지를 위한 안전성 세부 기준이 개발되어야 하며, 저장조 구조 (입식, 좌식)와 규격 (10 ton, 20 ton, 50 ton 등) 뿐 아니라 매몰 깊이 등 매몰지 조성방법에 있어서도 보다 세부적으로 개발되어 구조적인 안전성을 확보해야 함
- ✓ 또한, 침출수 및, 악취로 인한 2차 환경 피해가 발생하지 않도록 매몰지 조성 후 지속적인 관리가 필요함.

### (3) FRP 매몰지 조성시 유의사항 및 안전관리

- ✓ SOP에 명시된 매몰지 조성방법에는 FRP 저장조 설치에 관한 유의사항이 없으므로 아래와 같이 지자체별 유의사항을 따라 매몰지를 조성하고 있어 지자체 및 현장 여건에 따라 매몰지 조성 방식이 달라짐.
- ✓ 지자체 (고양시)의 작업 중 유의사항

- 토압, 가스발생을 감안하여 FRP 저장조 용량의 70%이하로 가축을 매몰함.
- 사체가 한 곳으로 집중되지 않게 용기 매립지 바닥을 수평으로 터파기함.
- 사체 투입 완료 후 용기 입구를 철저히 밀폐함 (해충 출입 방지).
- 유공관, 가즈 배출관에 악취 방지제 및 해충 방지망 설치.

- ✓ FRP 저장조는 침출수 우려가 없는 매몰지로 분류되어 관측정을 설치하지 않으며, 이에 따라 육안에 따른 저장조 파손이 이뤄진 후 침출수가 유출되었는지 유무를 판단함.
- ✓ 해빙기시 매몰지 훼손으로 인한 침출수 유출 및 2차 피해 예방을 위해 가축 매몰지의 집중 점검이 시행되는데, 이때 FRP 저장조는 침출수 유출 우려가 적다고 판단되어 점검 대상에서 제외됨.
- ✓ 또한, 매몰 방식으로 조성된 가축매몰지는 가축매몰지역 환경조사지침(‘16.6월) “생물학적 안전관리” 규정에 따라 토양미생물(클로스트리디움 등) 검사를 시행해야 하지만 FRP 저장조 등 밀폐형 저장조 사용 매몰지는 저장조 파손 등 관리상태 점검 후 침출수 유출 우려가 없는 경우 토양미생물 검사를 생략할 수 있음.
- ✓ 이처럼 FRP 매몰지에 대한 안전관리는 육안 검사 이외에는 거의 없다고 볼 수 있는 수준으로 관리가 되고 있음. FRP 저장조에 대한 안전성 하나만 보고 관리가 되고 있는 실정이지만 현재까지 일부 FRP 저장조가 파손되어 침출수가 유출된 사례가 보고되었고, 이는 FRP 저장조 안전성에 대한 의심이 필요하며 안전한 FRP 매몰지를 조성하기 위해서는 FRP에 대한 표준 규격 및 조성 방법의 매뉴얼이 시급하다고 판단됨.

## 2) 생석회 사용에 따른 매몰지내 문제점 파악

- 생석회 사용에 따른 문제점

- ✓ 긴급행동지침(SOP)상 구체적인 생석회 사용량이 제시되어 있지 않으므로 현장에서 무분별하게 사용됨.

□ 생석회 사용 현황(환경운동연합 보도자료 중 발췌)

1) 농림수산부 규제역 긴급행동지침에는 ‘사체 투입 전 흙의 중간 부위(약 50~60cm 구간)에 생석회(5cm)를 도포한 뒤, 사체를 투입 후 흙으로 덮은 다음 두 번째로 생석회(5cm)를 도포한다. 마지막으로 지표면에서 1.5cm 이상 성토를 한 뒤, 생석회(5cm)를 마지막에 도포한다.’ 라고 명시되어있다. 그러나 위와 같은 지침에는 살처분 가축 두수에 따른 생석회 사용량이 정해져 있지 않아 실제 규제역 현장에서는 표준지침도 없이 무분별하게 생석회를 사용되고 있다.

2) 이천시 ‘매몰지 작업 계획’ 을 살펴보면 살처분 가축에 대한 생석회 사용량의 일정한 표준량 없이 무분별하게 사용되고 있다. 규제역 생석회 사용 현황을 살펴보면 총 살처분 가축 282,021두수에 대한 생석회 사용량은 2,131톤에 이른다. 즉 살처분 가축 한 두당 약7~8kg의 생석회가 사용되는 것을 확인할 수 있다.

각 매몰지의 축종두수와 생석회 사용량을 비교하면 돼지 550 마리에 대한 생석회 사용량이 6톤이 사용되었으나, 인근 지역의 경우 돼지 579 마리에 11톤의 생석회가 사용됐다. 즉 29마리 차이로 생석회 소요량이 2배나 차이가 난다. 마찬가지로 돼지 579 두수와 돼지 1000 두수에 대한 생석회 소요량이 가축의 두수와는 상관없이 똑같이 생석회 11톤을 사용했다. 아래의 표는 총 217농가 중 몇 곳의 농가의 자료만 추출해서 비교했다. 그러나 전체 농가를 비교해 보면 많은 농가에서 축종 두수와는 상관없이 생석회가 무분별하게 사용되었음을 확인할 수 있다.

주소	축종	두수	매몰지 개수	재료명	소요량
A지역	돼지	550	1	생석회	6톤
B지역	돼지	550	1	생석회	8톤
C지역	돼지	579	1	생석회	11톤
D지역	돼지	580	1	생석회	5톤
E지역	돼지	1000	1	생석회	11톤
F지역	돼지	1000	1	생석회	6톤
G지역	돼지	1200	1	생석회	10톤
H지역	돼지	1200	1	생석회	8톤

표4) 규제역 가축 두수 당 생석회 소요량 비교

3) 생석회 사용량에 대한 과학적 근거 및 분석이 미약한 상황에서 생석회의 무분별한 사용은 또 다른 2차 환경오염을 야기한다. 생석회의 특징은 물(또는 수분)과 만나면 급속도로 끓어올라 100℃ 이상의 발열반응을 한 뒤 소석회로 변한다. 1차 발생열로서 규제역균을 살균하지만, 2차로 식은 소석회는 강알칼리성으로 된다. 문제는 2차로 식은 소석회가 침출수화 되었을 때 강알칼리성에 의한 또 다른 수질오염 및 토양오염을 발생시킬 수 있다는 점이다.

- ✓ 생석회는 강알칼리제로 가축사체 매몰 시 소독제로 널리 사용되고 있으나, 물과 접촉 시 200℃ 이상의 발열반응이 일어나므로 차수재(비닐)의 훼손에 대한 우려가 있

음(감사원보고서).

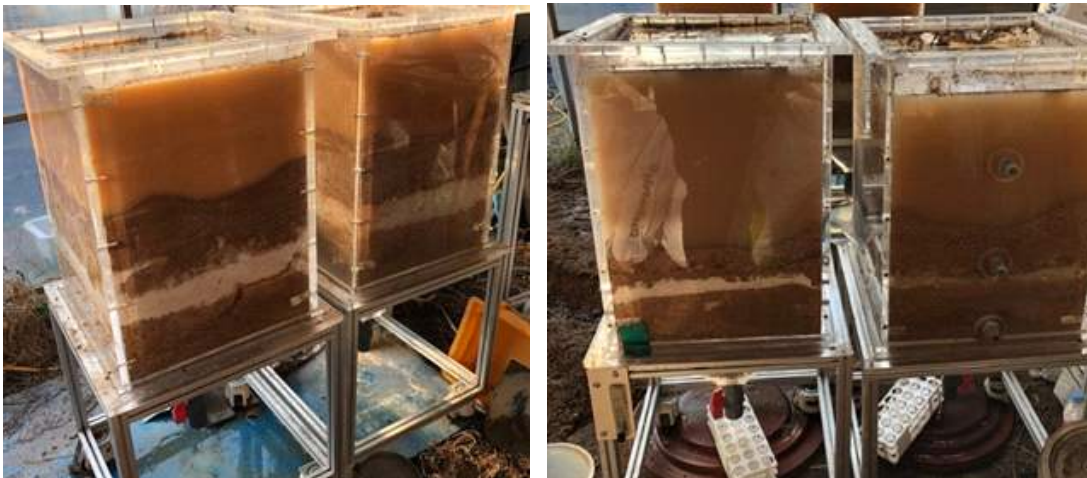
### 3) 생석회 대체물질 파악 및 대체물질 사용효과 실험

#### (1) 생석회 대체물질 조사

- ✓ 농림축산식품부는 감사원 감사결과를 수용하면서 매몰지 조성 시 매몰지 내부에 생석회 대신 소석회 등 대체 소독제를 우선적으로 사용하도록 하고, 부득이하게 생석회를 사용할 때에서 발열반응에 의한 차수막 손상이 방지되도록 개선방안을 마련해야한다는 의견을 제시함.
- ✓ SOP에서 언급된 소독제 중 가성소다 및 탄산소다의 경우 물에 쉽게 용해되어 지반침하와 같은 매몰지의 구조변형을 가져올 위험이 있으며, 생석회가 빠르게 용해될 시 소독제로서의 지속성이 떨어질 수 있으므로 이러한 문제점 발생이 적은 소석회를 제안함.
- ✓ 소석회는 알칼리제로서 pH조절(10-12)을 통한 살균효과가 있으며, 생석회가 수분과 접촉했을 때 발생하는 발열반응과 같은 2차 피해 발생에 대한 우려가 없으며 저렴한 비용과 수급이 용이하다는 장점이 있음.

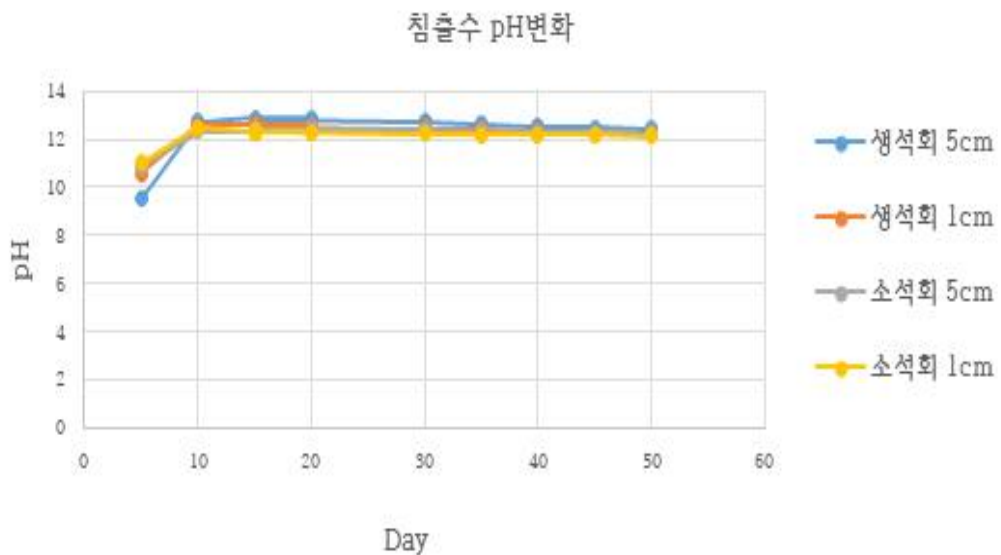
#### (2) 생석회 대체물질 효과 검증

- ✓ 살균효과 검증(pH 조절)
  - 소석회의 살균효과(pH 조절)를 확인하기 위하여 토양에 생석회와 소석회를 처리한 후 50일간 침출수의 pH변화를 조사하여 소석회의 pH조절 능력을 확인하고자 하였음 .
  - 서울시립대 소재의 배봉산 토양(pH: 4.5)를 이용하여 아래 그림과 같이 생석회와 소석회를 각각 5 cm와 1cm씩 처리하여 생석회 사용량에 따른 침출수의 pH변화를 조사하고자 하였음.
  - 실험을 진행하는 동안 총 3,000L의 물을 2.5L/hr의 속도로 관주하였음.



<그림 10> 생석회 및 소석회 pH 조절 실험

- 실험결과 초기 침출수에서 pH는 소석회가 더 높았으며, 10일부터 모든 처리구에서 pH가 12이상으로 유지. 생석회 pH가 더 낮은 이유 제시 필요(아마 용해도가 소석회가 더 높음)  
 이에 가축매몰지에서 발생하는 침출수에 대한 소독제로 소석회도 적합하다는 것을 확인하였음



<그림 11> 처리에 따른 침출수 pH 변화

- pH조절로 인한 살균효과를 검증하기 위하여 살균실험에 주로 이용되는 E.coli를 생석회 및 소석회용액에 배양후, NA배지에 도말하여 살균효과를 조사하였음.
- 대조구(증류수 배양)와 비교하여 생석회 및 소석회 처리에서 E.coli가 배양되지 않은 것을 확인함.
- 이에 생석회와 소석회가 비슷한 정도의 살균효과를 나타냈으므로 생석회 대체물질로 소석회의 적합성을 검증함.





증류수 배양(Control)	소석회(pH 12.48)	생석회(pH 12.40)
-----------------	---------------	---------------

<그림 12> 생석회 및 소석회의 E.coli 살균효과

✓ 피복소재 훼손 여부

- 생석회 및 소석회의 pH조절 능력을 비교하기 위한 실험을 진행하던 중 생석회를 처리한 층에 물이 통과하면서, 약 100°C이상의 열이 발생하여 아래 그림과 같이 아크릴 용기 영카에 변형이 생김(일부 국소적으로 녹는 증상)

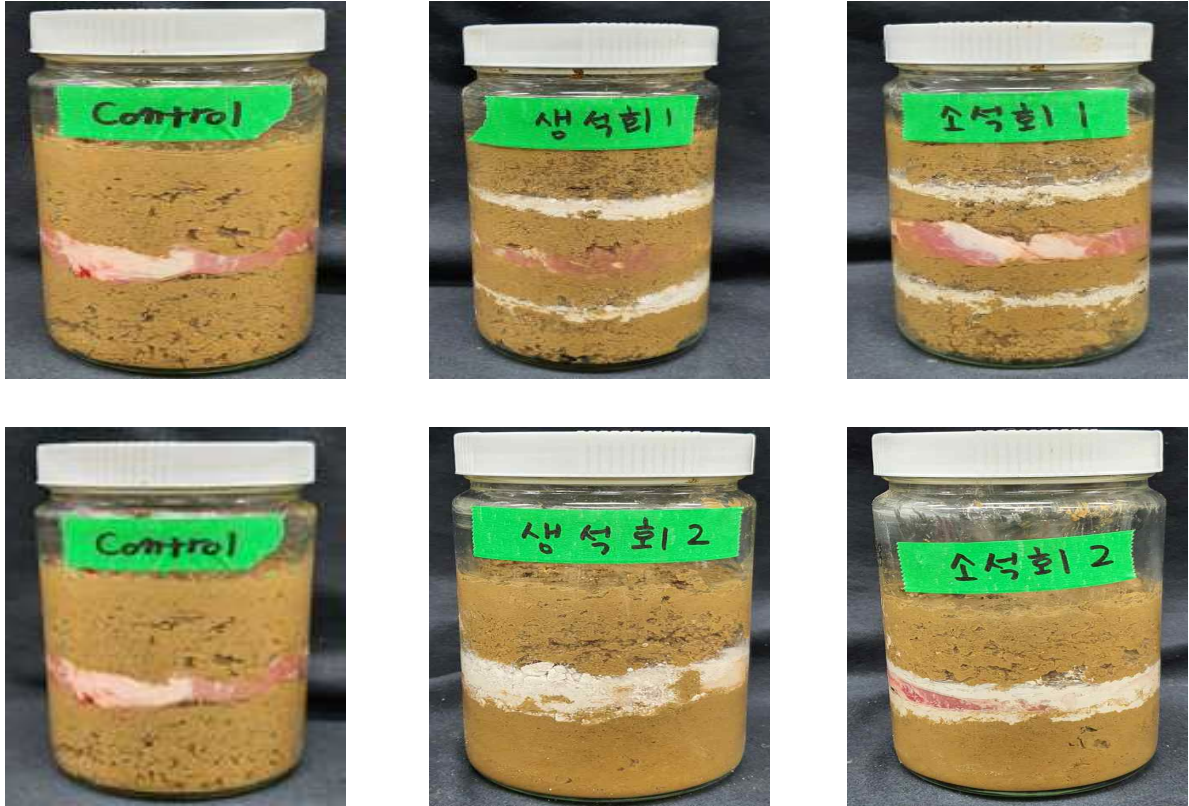


<그림 13> 생석회 처리로 인한 아크릴 용기 변형

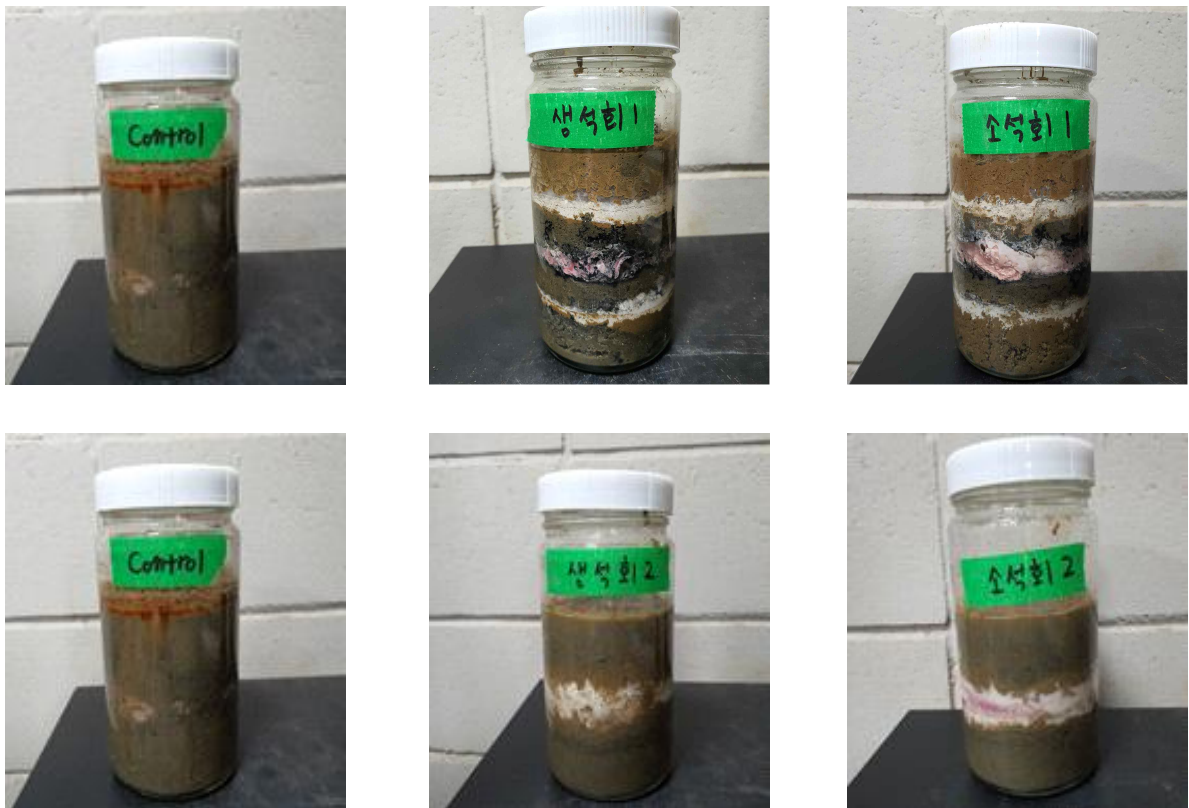
- 자체적으로 실시한 비닐 소재에서도 국소적으로 비닐의 변형이 생김
- 반면에, 소석회는 수분과 접촉 시 발열반응이 나타나지 않으므로, 소석회 처리로 인한 피복소재 훼손에 대한 우려가 없음.

✓ 가축 사체 부패 실험

- 생석회 및 소석회 처리가 가축 사체 분해에 미치는 영향을 조사하기 위하여 밀폐 용기에 돼지고기와 생석회 및 소석회를 처리하여 50일간 빛을 차단한 후, 25°C로 유지되는 챔버에 정치시켜 사체 분해 정도를 조사하였음.
- 처리1은 돼지고기(가축사체)와 소독제(생석회 및 소석회)를 토양을 처리하여 직접적으로 접촉되지 않도록 한 것이고, 처리2는 돼지고기에 동일한 양의 소독제를 직접 처리한 것임.
- 다음 그림은 각 처리별 1일차와 50일차 사진으로, 무처리구에 비해 소독제 처리구에서 부패정도가 적은 것을 확인할 수 있음.
- 소독제를 직접적으로 접촉시키지 않은 처리1이 처리2에 비해 더 많이 부패된 것을 가시적으로 확인할 수 있음.



<그림 14> 가축 사체 부패 실험 진행 1일차



<그림 15> 가축 사체 부패 실험 진행 50일차

- 돼지고기의 분해정도를 정확히 확인하기 위하여 실험시작과 실험종료 후의 돼지고기 무게를 측정하여 무게변화를 조사하였음.
- 가시적으로 보여지는 것과 같이 소독제 처리구에 비해 무처리구가 더 많이 돼지고기가 분해되었음.
- 소독제를 직접 돼지고기에 처리한 처리2에 비해 직접처리하지 않고 소독제와 돼지고기 사이에 토양을 처리한 것(처리1)에서 사체 분해가 더 많이 진행된 것을 확인함.

<표 5> 소독제 처리별 돼지고기 무게 변화

	처리전	처리후 (g)	무게변화	분해율 (%)
Control	112.76	75.55	37.21	33.0
생석회1	94.29	75.68	18.61	19.7
생석회2	97.77	82.64	15.13	15.5
소석회1	110.04	92.25	17.79	16.2
소석회2	82.98	71.51	11.47	13.8

#### 4) 지하침출수 유출 및 악취 발생 우려가 적은 매몰지 조성방법 제시

- ✓ 매몰지 입지 선정에 필요한 인자, 새로 개발한 피복소재, 생석회 대체물질, 침출수/악취 저감을 위한 물질(미생물 제제, Biochar 등) 등을 종합한 새로운 매몰지 조성방법 제시



## 5) 생석회 대체물질 제시 및 사용기준 설정

### • 생석회 대체물질 사용기준 설정

- ✓ 소식회의 살균효과 검증을 통해 생석회 대체물질로서의 적합성을 확인하였으며, 앞서 수행했던 컬럼(60L(cm) x 60W(cm) x 90H(cm)) 실험 결과를 이용하여 소식회의 사용량을 제시하고자 함.
- ✓ 농림축산식품부에서 공시한 구제역 긴급행동지침에는 ‘사체 투입 전 흙의 중간 부위(약 50~60cm 구간)에 생석회(5cm)를 도포한 뒤, 사체를 투입 후 흙으로 덮은 다음 두 번째로 생석회(5cm)를 도포한 후 지표면에서 1.5cm 이상 성토를 한 뒤, 생석회(5cm)를 마지막에 도포한다.’라고 명시되어있다. SOP에서 제시한 생석회 사용량과 동일하게 소식회를 5cm 처리할 시 1.8m<sup>3</sup>, 1cm 처리는 0.36m<sup>3</sup> 평만큼의 부피를 차지하게 됨.
- ✓ 소식회 살균효과 검증 실험을 진행하는 동안 총 3,000L 이상의 물을 염기성(pH 12 이상)으로 유지시켰으므로, 이를 통해 소식회의 pH 조절을 통한 침출수 살균효과를 확인함.

<표 6> 축종별 평균 무게 및 체적(영국 EA 보고서)

축종	부피(m <sup>3</sup> )	무게(kg)	수분함량(%)	
식용육우	성우	0.17	550	70
	육우	0.13	450	70
	어린암소	0.10	360	70
	송아지	0.04	135	70
젖소	성우	0.18	600	70
	어린암소	0.13	450	70
	송아지	0.04	135	70
돼지	성돈	0.012	150	70
	중돈	0.008	100	70
	어린돼지	0.001	16	70
가금류	암닭	-	1.8	70
	싸움닭	-	1.5	70
	오리, 칠면조거위	-	8	70
양	0.016	50	70	

돼지의 경우 평균 매몰두수는 1,680두수으로써 축 중간 가장 큰 평균 체적을 가지고 있으며, 여기서 유기물의 양은 76ton, 침출수(체액)는 176ton으로 추정할 수 있다. 돼지 1,680마리를 9L(m) x 9W(m) x 4H(m) 크기의 매몰지에 매몰했을 시 발생하는 침출수의 양을 176ton으로 가정하였을 때, 본 실험의 결과를 대입하면 소식회를 SOP에 명시된 사용량과 같은 5cm를 사용할 시 정화할 수 있는 침출수의 양은 540ton으로 추정할 수 있음.

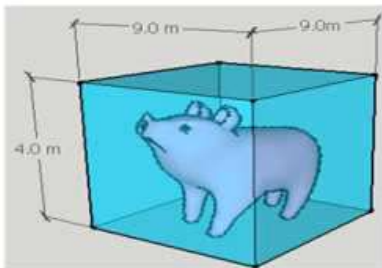
- ✓ 따라서, 돼지 매몰 시 발생하는 침출수의 양(176ton)을 정화하기에 충분한 양임을 확인할 수 있음.

- ✓ 반면, 소석회를 1cm 사용 시 정화 가능한 침출수의 양은 108ton으로 추정할 수 있으며, 가축매몰지에서 발생하는 침출수를 정화하기엔 부족한 양으로 판단되며, 본 과제에서 제안한 생석회 대체물질인 소석회를 가축매몰지 소독제로 사용할 시 현재 SOP에 있는 생석회 사용량과 동일하게 사용하거나, 적은 양을 사용할 수 있을 것으로 판단됨.
- ✓ 따라서, '사체 투입 전 흙의 중간 부위(약 50~60cm 구간)에 소석회(2-5cm)를 도포한 뒤, 사체를 투입 후 흙으로 덮은 다음 두 번째로 소석회(2-5cm)를 도포한 후 지표면에서 1.5cm 이상 성토를 한 뒤, 소석회(2-5cm)를 마지막에 도포한다.'로 소석회 사용량을 제안함.

**Livestock burial Models**

**Swine**

- 1680 heads



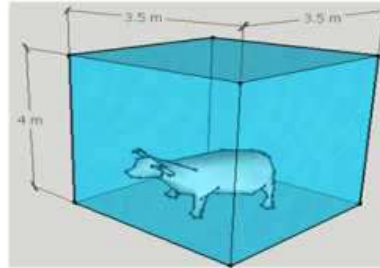
- Soild : 76 ton
- Liquid : 176 ton
- Soil : 1783 ton

✓ **Leachate conc**

- $NH_4$  as N  
→  $10.2 \cdot 10^3$  mg/l
- Organic Carbon  
→  $46.4 \cdot 10^3$  mg/l
- P  
→  $1.6 \cdot 10^3$  mg/l

**Bovine**

- 70 heads



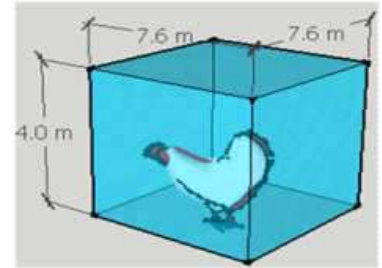
- Soild : 12 ton
- Liquid : 27 ton
- Soil : 293 ton

✓ **Leachate conc**

- $NH_4$  as N  
→  $11.3 \cdot 10^3$  mg/l
- Organic Carbon  
→  $56.6 \cdot 10^3$  mg/l
- P  
→  $1.2 \cdot 10^3$  mg/l

**Poultry**

- 47510 heads



- Soild : 55 ton
- Liquid : 125 ton
- Soil : 1420 ton

✓ **Leachate conc**

- $NH_4$  as N  
→  $8.8 \cdot 10^3$  mg/l
- Organic Carbon  
→  $64.9 \cdot 10^3$  mg/l
- P  
→  $1.9 \cdot 10^3$  mg/l

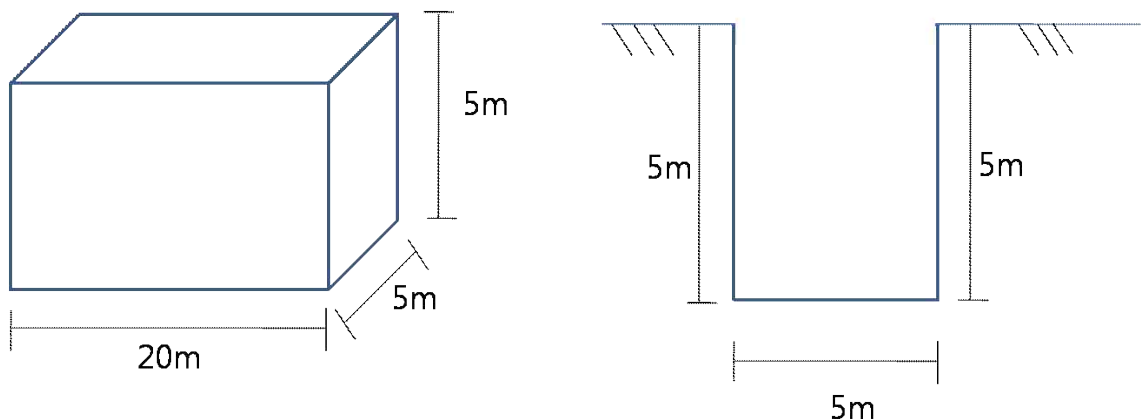
<그림 16> 우리나라 축종별 가축매몰지 일반적인 오염물질 모형(한국환경산업기술원, 2017)

## 2-3. 매몰지 유출 차단용 피복소재(비닐, 필름 등) 개발

### 1) 기존 매몰지에 사용된 차단용 피복소재 조사

#### (1) 비닐소재 차단재

- ✓ 차수재로 사용되는 비닐은 가축매몰지 환경관리 지침(환경부, 2010.11)에 따르면 매몰지 부피보다 규격이 큰 2중 비닐(두께 0.1 mm 이상)을 적용하도록 규정함.
- ✓ 구제역 긴급행동지침(농림수산식품부, 2011.07)에 따르면 두께 0.2 mm 이상의 2중 비닐로 고강도 방수재질을 적용토록 명시하여 차수재의 규격을 향상함.
- ✓ 가축매몰지에 적용된 비닐은 일반적으로 비닐하우스용 비닐로 LDPE(Low Density Polyethylene) 재질임.
- ✓ LDPE는 내충격성, 내저온취화성, 유연성, 가공성, 필름의 투명성, 내화학성, 수성, 전기절연성 등이 우수함.
- ✓ 두께가 0.01~0.2 mm까지 다양하며 최대폭은 15~20m로 조사 되었음.
- ✓ 구제역 긴급행동지침(농림수산식품부)는 대규모 매몰 시 1개소 당 규모가 500 m<sup>3</sup> (5L(m)×5W(m)×20H(m))를 초과하지 않도록 규모를 분할하여 조성토록 함.



<그림 17> 구제역 긴급행동지침상 매몰지 최대크기 및 단면도

- ✓ 구제역 긴급행동지침에 따라서 매몰할 경우 피복 소재의 폭은 최소 15m 이상, 길이는 30m 이상이어야 함.
- ✓ 두께 0.15 mm 비닐은 폭 18 m로 생산되며 가축 매몰지 차수재로 사용할 경우 겹침이음이 발생하지 않아 침출수 유출 가능성이 낮음.
- ✓ 두께 0.2 mm 비닐의 경우 폭은 3.6m 로 생산되고 있으며 가축 매몰지 차수재로 사용할 경우 겹침이음이 발생되어 침출수가 유출될 가능성이 있음.
- ✓ 국내 농업용비닐 생산업체에 폭을 16m, 두께 0.2 mm로 생산가능을 요청하였으나 생산설비 변경이 필요하여 불가능하다 함.
- ✓ 침출수 유출을 방지하기 위하여 차수재의 폭이 중요하며 두께가 얇아진 만큼 겹침 시공이 필요하다 사료됨.
- ✓ 살처분되는 가축으로 인한 찢어짐을 방지하기 위해 재료의 보강이 필요함.

## (2) HDPE 차단재

- ✓ HDPE는 매우큰 분자량을 가진다는 측면에서 파리핀 왁스와 구분됨.
- ✓ 구체역 긴급행동지침에 따르면 비닐이 아닌 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 등 고강도방수재질을 사용한 경우 부직포, 비닐커버 등을 추가로 덮는 것을 생략할 수 있음.
- ✓ HDPE(High Density Polyethylene)은 매우 큰 분자량(약 수천에서 수백만)을 가지며, 분자량이 증가할수록 충격강도, 내환경응력균열성, 연신율 등 물리적 성질은 향상되나, 용융 정도는 증가하여 가공성은 저하됨.
- ✓ HDPE의 경우 두께와 강도가 뛰어나고 열융착에 의해 크기를 자유롭게 늘리 수 있음.
- ✓ 열융착을 위해 두께가 최소 1.5 mm 이상이어야 함.
- ✓ 두께 1.5 mm 이상의 HDPE는 일반적인 시공이 불가능하고 전문 시공업체가 시공하며 LDPE재질에 비해 고가임.

## (3) 혼합토

- ✓ 대표적으로 사용되는 점토광물은 벤토나이트로서, 벤토나이트는 주로 응회암 또는 화산재와 같은 유리질 화산물질의 화학적 변질로 수반된 광물 또는 탈유리화 작용에 의해 형성된 결정질 점토로 구성된 암석임.
- ✓ 화산유리질 물질 내의 반정에서 기원된 장석, 흑운모, 석영, 방해석 등의 부성분 광물 등을 수반한다. 벤토나이트는 물과 반응 시 원래의 체적보다 약 13~16배가 팽창하여 자체 무게의 5배까지 물을 흡수하는 특성을 갖고 있음.
- ✓ 토사와 섞어 층을 만들면 물을 침투하지 못하게 되는 특성을 이용하여 폐수처리장이나 쓰레기 매립장의 주변 지하수의 오염을 방지하는데 사용됨.
- ✓ 벤토나이트로 보관이나 이송이 편리함.

## 2) 기존 차단용 피복소재에 추가 피복소재 또는 대체 차단용 피복소재 조사

### (1) 대체 차단용 피복소재의 필요조건

- ✓ 가축전염병 발생 시 긴급히 생성되는 매몰지에 사용되어야하기 때문에 수급이 쉬워야 함.
- ✓ 낮은 투수율로 침출수를 차단해야 함.
- ✓ 구체역 긴급행동지침(농림수산식품부)의 매몰지규모(5L(m)×5W(m)×20H(m))를 덮을 수 있는 크기이거나 이음이 가능한 재질이어야 함.
- ✓ 가축전염병의 발생으로 인해 가축방역에 사용된 중장비 및 인력의 이동이 제한됨으로 시공이 용이해야 함.
- ✓ 시공비용이 경제적이어야 함.

### (2) 대체 차단용 피복소재의 선정

- ✓ 매몰지는 가축병원성 폐기물을 폐기하는 매립지를 조성하는 것이며, 수백톤의 사축이 분해되어야 함.

- ✓ 유기물 분해에는 적정한 수분이 필요하지만 현재의 형태는 이러한 수분공급이 되지 않음.
- ✓ LDPE, HDPE의 경우는 침출수가 유출되지 않고 강우도 유입되지 않게 차수의 기능만 하고 있음.
- ✓ 벤토나이트의 경우 강우에 의해 유입된 우수는 가축사체분해이용 한 후 오염물질을 흡수하여 정화가 가능함.
- ✓ 벤토나이트를 이용한 차수의 경우 비닐과 같은 폐기물을 발생시키지 않음.
- ✓

구분	장점	단점
비닐 (LDPE)	<p>혼합토에 비해 더 낮은 투수율을 보임 경량임 대부분의 화학물질에 대한 내구성이 높음 온도에 대한 저항성이 높음 접합상태가 양호함 성형 및 가공이 용이함 인장력이 좋고, 기계적 작업성 뛰어남 HDPE 보다 충격강도(impact strength)와 인열강도(internal tearing strength) 등이 우수함.</p>	<p>시공 시 돌출부, 날카로운 물체에 의한 찢어짐, 구멍 등의 문제가 발생함 시공 후 파손 부위의 발견 및 복구가 어려움 사면부에서의 시공이 어려움 지하수, 가스 등에 의한 양압력을 받음 일반적인 소매형태로 구매가 어려움 접합 작업을 전문기술자가 해야 하며 접합부의 확인 작업이 어려움 HDPE 보다 연화점(softening point)이 낮고, 강성, 경도, 인장강도 및 파열강도 등이 떨어짐</p>
HDPE	<p>혼합토, 비닐(LDPE)에 비해 더 낮은 투수율을 보임 경량이며 고강도임 대부분의 화학물질에 대한 내구성이 높음 온도에 대한 저항성이 높고 강도가 큼 접합상태가 양호하다. 내마모성이 크며 성형 및 가공이 용이함 HDPE 사용 시 부직포, 비닐커버 등을 추가로 덮는 것을 생략 가능함 비닐(LDPE) 보다 연화점이 높고 강성, 경도, 인장강도 및 파열강도 등이 우수함</p>	<p>시공 시 돌출부, 날카로운 물체에 의한 찢어짐, 구멍 등의 문제가 발생할 수 있음 시공 후 파손 부위의 발견 및 복구가 어려움 사면부에서의 시공이 어려움 지하수, 가스 등에 의한 양압력을 받음 일반적인 소매형태로 구매가 어려움 접합 작업을 전문기술자가 해야 하며 접합부의 확인 작업이 어려움 비닐(LDPE) 보다 충격강도와 인열강도 등이 떨어짐</p>
혼합토 (흙-벤토나이트)	<p>일반 흙에 비해 더 낮은 투수율을 보임 침가된 벤토나이트는 침출수내 오염물질에 대한 흡착능력이 뛰어남 현장의 상황에 따라 적용이 가능함</p>	<p>합성차수막(LDPE, HDPE)에 비해 투수율이 높음 겨울철 혹한기에 현장에서 흙과 벤토나이트를 혼합하는 것이 어려움</p>



### 3) 침출수 유출 차단용 추가 피복소재 또는 대체 차단용 피복소재 Lab test 및 제시

#### (1) 벤토나이트를 이용한 차수소재 Lab test

가. 사용된 흙의 특성 조사

##### ① 흙의 입도시험(KS F2302)

✓ 체분석

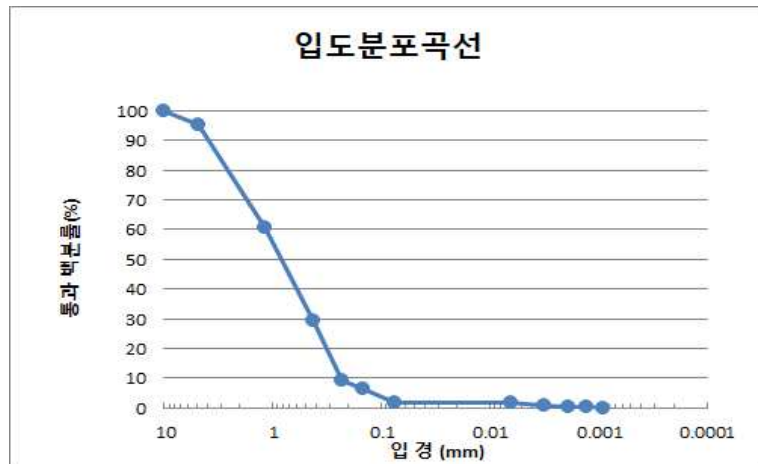
체번호	4	10	16	40	60	100	200
체눈금 (mm)	4.76	2.0	1.19	0.42	0.25	0.149	0.074

- 체를 통과한 흙의 중량을 구하여 흙입자의 크기와 분포를 알 수 있음

✓ 입도분포곡선 작성

- 입도분포곡선으로부터  $D_{10} = 0.24\text{mm}$ ,  $D_{30} = 0.44\text{mm}$ ,  $D_{60} = 1.23$  로 나타남.

-  $C_u = 5.125$ ,  $C_g = 0.6558$  로 나타남.



- 통일분류법에 의해 SP로 분류

No.200체 통과율 < 50% → G 또는 S

No.4체 통과율 ≥ 50% → S

0% < No.200체 통과율 < 5%,  $C_u \leq 6$ ,  $C_g < 1$

통일분류법에 의해 SP(입도분포가 나쁜 모래)로 분류됨

##### ② 흙의 비중시험(KS F2308)

흙입자의 비중은 흙의 기본성질인 간극과 포화도를 아는데 필요할 뿐만 아니라 흙의 다짐 정도와 유기질 흙에 있어서 유기물 함량을 구하는데 이용됨

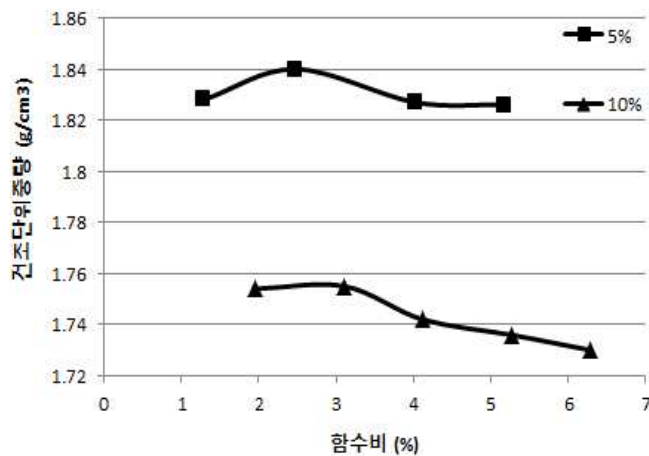
✓ 보통 흙의 비중이 2.6 정도로 측정이 되는데 이 실험에서는 2.58이 측정됨

✓ 이러한 결과는 건조단위중량의 감소와 연관될 수 있음

나. 흙과 벤토나이트 혼합 실험 (KS F2312)

① 다짐실험

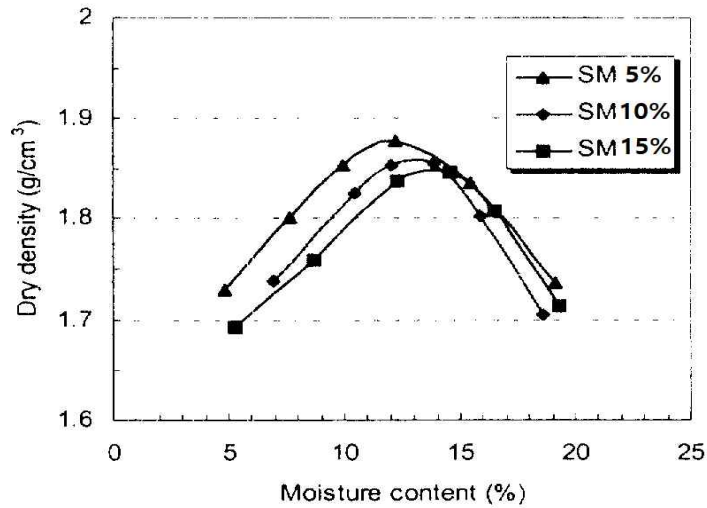
- ✓ 느슨한흙의 다짐으로 인해 흙의 단위중량이 증가하고 전단강도가 증가하며, 투수계수와 압축성을 감소시키기 위함
- ✓ 화강풍화토와 벤토나이트(5, 10%)를 혼합한 흙의 다짐시험을 실시
- ✓ 다짐시험을 실시하여 최대건조단위 중량과 최적함수비를 구함
- ✓ 입도분포 시험에 의해 SP로 분류된 흙과 벤토나이트를 혼합비별로 여러 번(약 5회) 실시하여 다짐곡선을 작성함.



혼합비	D.M.D ( $g/cm^3$ )	O.M.C (%)
SP	1.86	1.61
SP + 5%	1.840	2.48
SP + 10%	1.755	3.11

- ✓ 벤토나이트의 혼합량이 증가할수록 최대건조단위중량은 감소하고 최적함수비는 증가하는 결과를 볼 수 있음
- ✓ 최대건조단위중량 감소의 원인은 벤토나이트 혼합량 증가에 따른 비중감소와 벤토나이트의 부피 팽창으로 인한 밀도 감소로 판단됨
- ✓ 최적함수비의 증가 원인은 친수성이 큰 벤토나이트 혼합량의 증가에 따라 보유되는 물의 양이 많이 지기 때문으로 판단됨

• 참고문헌과의 비교



혼합비	D.M.D ( $g/cm^3$ )	O.M.C (%)
SM	1.891	11.3
SM + 5%	1.877	12.2
SM + 10%	1.862	12.8

- ✓ [김수문, 염희남, 임남웅 ‘벤토나이트와 시멘트가 매립장 차수층의 투수성과 압축강도에 미치는 영향’ 중앙대학교 건설대학과 환경공학과]에서 사용된 흙은 SM으로 분류됨
- ✓ 실험의 결과 중 함수비가 참고문헌 보다 현저히 낮은 값으로 측정되었는데 이는 참고문헌의 SM으로 분류된 흙은 세립토 함량이 15.1%으로 공대앞 흙의 세립토 함량인 1.95% 보다 상당히 높은 값을 보이고 있기 때문이라고 판단됨

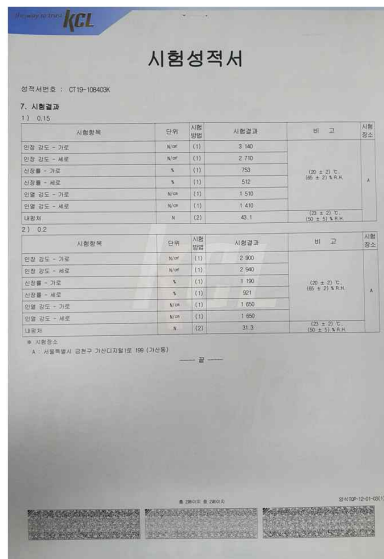
② 변수두 투수시험

- ✓ 변수두 투수시험은 점성토의 투수계수를 측정하기 위해 실시됨
- ✓ 벤토나이트의 혼합비별 투수계수를 측정하여 매몰지 기준인  $1 \times 10^{-7} cm/sec$  이하를 만족하는 벤토나이트의 혼합비를 찾기 위함
- ✓ 화강풍화토와 벤토나이트(5, 10%)를 혼합한 흙의 투수계수를 측정
- ✓ 실험에 사용한 SP로 분류된 흙은 벤토나이트를 10%까지 혼합하였을 때까지  $1.26 \times 10^{-4} cm/sec$ 로 매몰지 기준을 만족하지 못함.
- ✓ 참고문헌에 의하면 SM으로 분류된 흙은 벤토나이트를 15% 혼합하였을 때 매몰지 기준에 만족하는 투수계수를 얻을 수 있었음.

#### 4) 지하침출수 유출 차단용 추가 피복소재 또는 대체 차단용 피복소재 현장 실험

- ✓ 현재 사용되고 있는 피복소재인 비닐소재 차수재의 두께 별 인장강도, 인열강도 및 내평처 강도 실험을 폴리에틸렌 필름의 기계적 성질 시험 방법(KS M 3001:2001)에 따라 공인실험기관에 의뢰하여 실시함.
- ✓ 두께 0.15 mm 비닐의 경우 인장강도의 평균값은 0.2 mm 와 유사하게 나타났으나 신장율은 두께 0.2mm 비닐의 60%로 나타나 신축성이 낮은 것으로 사료됨.
- ✓ 찢어짐 강도를 나타내는 인열강도는 두께 0.2mm 비닐보다 약 12% 낮은 것으로 나타났으며 이는 두께에 의한 차이로 해석 됨.
- ✓ 꿰뚫림강도를 나타내는 내평처 강도는 두께 0.2mm 비닐보다 약 37% 높게 나타났음.
- ✓ 두께 두께 0.2mm의 비닐은 두께 0.15mm 비닐 보다 신장율이 높고 내평처 강도가 낮아 연질의 비닐로 판명되며 두께차이로 인해 인장강도는 유사하며 인열강도는 더 높게 나타났음.
- ✓ 두께 0.15mm 와 두께 0.2mm의 비닐의 강도차이는 크지 않아 광폭으로 적용이 가능한 두께 0.15mm 비닐의 사용하는게 바람직하다 사료됨.

구분		두께 0.15 mm	두께 0.2mm
인장강도 (N/cm <sup>2</sup> )	가로	3140	2900
	세로	2710	2940
신장율 (%)	가로	753	1190
	세로	512	921
인열강도 (N/cm <sup>2</sup> )	가로	1510	1650
	세로	1410	1650
내평처 강도(N)		43.1	31.3



<그림 18> 차수재 실험 공인성적서

## 5) 지하침출수 유출 차단용 피복소재 확립

### (1) 피복소재의 필요 조건

- ✓ 가축전염병 발생 시 긴급히 생성되는 매몰지에 사용되어야하기 때문에 수급이 쉬워야 함.
- ✓ 낮은 투수율로 침출수를 차단해야 함.
- ✓ 구제역 긴급행동지침(농림수산식품부)의 매몰지규모(5L(m)×5W(m)×20H(m))를 덮을 수 있는 크기이거나 이음이 가능한 재질이어야 함.
- ✓ 가축전염병의 발생으로 인해 가축방역에 사용된 중장비 및 인력의 이동이 제한됨으로 시공이 용이해야 함.
- ✓ 시공비용이 경제적이어야 함.

### (2) 피복소재의 확립

- 비닐차수재 및 HDPE 차수재
- ✓ 구제역 긴급행동지침(농림수산식품부, 2011.07)에 따르면 두께 0.2 mm 이상의 2중 비닐로 고강도 방수재질을 적용토록 명시하여 차수재의 규격화 함.
- ✓ 두께 0.2 mm 비닐의 경우 폭은 3.6 m 로 생산되고 있으며 가축 매몰지 차수재로 사용할 경우 접침이음이 발생되어 침출수가 유출될 가능성이 있음.
- ✓ 두께 0.15 mm 비닐은 폭 18 m 로 생산되며 필름의 물성 특징은 아래와 같이 조사되었음.
- ✓ 내평처 강도가 더 높게 나오고 두 비닐의 강도 차이는 크지 않아 0.15mm의 비닐을 사용하는게 바람직하다 판단 됨.

구분		0.15 mm	0.2mm
인장강도 (N/cm <sup>2</sup> )	가로	3140	2900
	세로	2710	2940
신장율 (%)	가로	753	1190
	세로	512	921
인열강도 (N/cm <sup>2</sup> )	가로	1510	1650
	세로	1410	1650
내평처 강도(N)		43.1	31.3

- ✓ HDPE 차수재의 경우 열융착이 가능한 두께 1.5 mm 이상으로 적용토록 하는 것이 바람직하다 판단됨



## 2-4. 매몰지 중 가축사체 매몰용 저장조의 표준규격 설정

### 1) 기존 가축사체 매몰용 저장조의 특성 조사

#### (1) 기존 가축사체 매몰용 저장조의 재질

- ✓ 기존 가축사체 매몰용 저장조의 재질은 FRP(Fiberglass Reinforced Plastics)와 PE(polyethylene) 재질로 조사되었으며 PE는 LLDPE(Linear Low density polyethylene)와 HDPE(High density polyethylene)로 나타남.
- ✓ 매몰용 저장조의 문제는 크게 찌그러짐과 깨지는 문제가 발생하였으며 대부분 LLDPE재질의 저장조에서 발생함.
- ✓ LLDPE 저장조는 현재 옥외 물탱크, 하수처리장의 약품탱크로 사용되고 있었으며 약품탱크로 사용 시 변형을 방지하고자 보강하여 사용됨.



<그림 20> 하부가 변형된 LLDPE 탱크



<그림 21> 보강한 LLDPE 탱크

- ✓ LLDPE 저장조는 현재 옥외 물탱크, 하수처리장의 약품탱크로 사용되고 있었으며 약품탱크로 사용 시 변형을 방지하고자 보강하여 사용됨.
- ✓ HDPE 재질은 배수 및 하수용 비압력 매설용관으로 사용되고 있었음.



<그림 22> HDPE 가축사체 매몰용 탱크

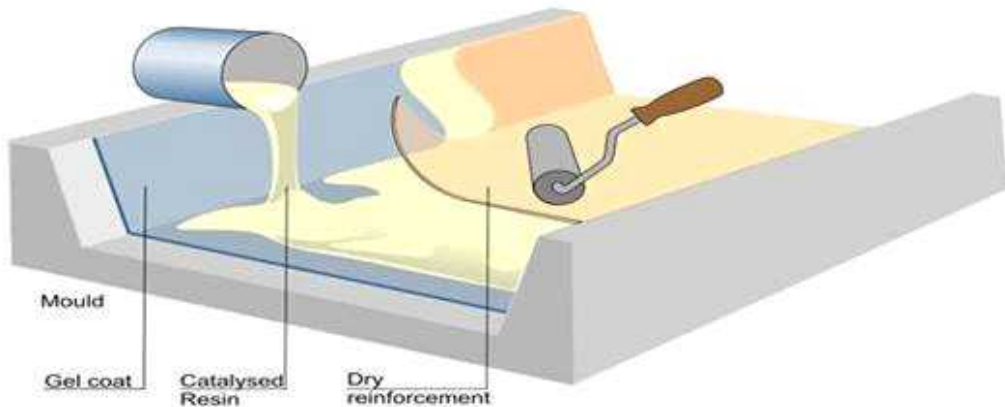
## (2) 기존 저장조의 제조방법

- ✓ 기존 사용된 가축저장조는 FRP제조 공법 중 Hand Lay Up 공법과 Filament Winding 공법으로 제작되었음.

✓

### • Hand Lay Up 공법

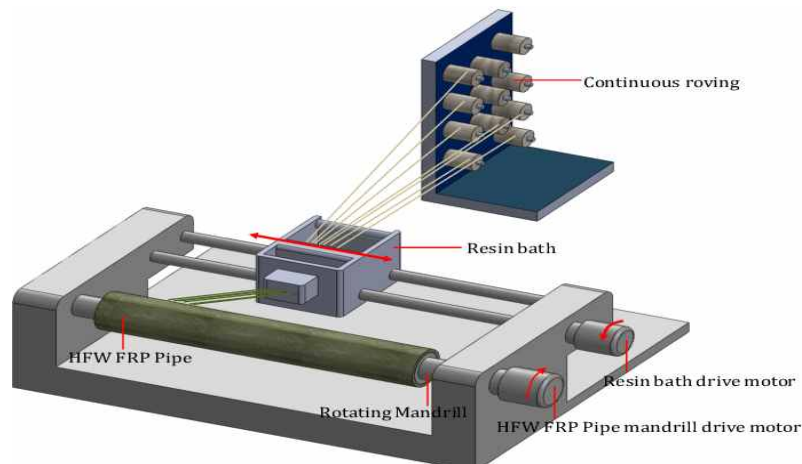
- ✓ FRP제자에 있어 기초적인 공법으로 몰드를 형성하여 그위에 유리섬유와 수지를 적층하는 공법임.
- ✓ 유리섬유를 한 장씩 몰드에 맞게 적층하며 브러쉬를 사용하여 수지를 함침 시킴.
- ✓ 적층되는 유리섬유의 기포를 제거하고 압착시키는 것이 중요하며 작업자의 숙련도에 따라 품질이 결정되어 품질이 균일하지 않음.



<그림 23> Hand Lay Up 공법

### • Filament Winding 공법

- ✓ 몰드가 회전하면서 레진에 함침된 원사를 감아서 성형하는 공법임.
- ✓ 반 자동화된 설비로 생산을 하기 때문에 제품 생산량이 높으나 다양한 모양의 제품의 생산이 불가능 함.
- ✓ 와인딩 장력, 와인딩 각도, 섬유의 종류에 따라 품질이 달라지며 기계적 생산으로 비교적 품질이 균일함.



<그림 24> Filament winding 공법



### (3) 기존 가축사체 매몰용 저장조의 문제점

- ✓ 2014년 매몰하여 관리기간 해제 후 토사를 야적하면서 토압에 의해 저장조가 찌그러진 사례가 있음.<그림 25>



<그림 25> LLDPE 저장조 현황 (□시)

- ✓ 지하수가 많고 배수가 불량한 지역에 저장조를 매립하여 지하수위에 의해 저장조가 떠오른 상태임.<그림 26>
- ✓ 저장조 상부가 파손되어 비닐과 합판으로 상부만 덮어 임시조치한 상태로 우수 침투로 안에 있던 가축사체가 노출되어 있음.



<그림 26> LLDPE 저장조 현황 (□시)

- ✓ 매몰지 조성 후 1.5m 이격거리에 농로를 신설하는 중 토압과 진동등에 의해 파손된 상태로 토양에 시멘트를 희석한 물을 뿌려 주변토양을 임시보강한 상태임.
- ✓ 파손된 부위로 우수가 침투하여 가득찬 상태이며 주변 굴착 시 파손된 부위로 다량의 침출수가 분출 됨.<그림 27>



<그림 27> LLDPE 저장조 현황 (ㄱ시)

- ✓ 매몰지 저장조의 악취 민원을 방지한다는 목적으로 저장조에 설치되어야 하는 에어벤트를 저장조 외부 땅에 형식적으로 설치 함.
- ✓ 저장조 점검구를 지반면보다 낮게 설치 하여 토사와 우수가 침투 됨.<그림 28>



<그림 28> LLDPE 저장조 현황 (ㅇ시)

- ✓ 저장조가 파손되고 침출수가 유출되면서 주변의 지반침하 발생됨.<그림 29>
- ✓ 저장조 내부는 침출수가 유출되면서 건조상태로 사체분해가 이루어지지 않음.



<그림 29> FRP 저장조 현황 (○시)

- ✓ 10톤 저장조 6개 위에 1.2m 정도 복토 후 자재 창고로 사용하였으며, 사용 중 지반 침하와 크랙이 발생됨.
- ✓ 저장조 파손으로 인해 지반침하와 크랙이 발생하였으며 저장조의 침출수 일부는 주변토양으로 유출 됨.<그림 30>



<그림 30> LLDPE 저장조 현황 (○시)

- ✓ 지반침하로 일부 저장조 훼손되었으며, 지하수로 인해 저장조 1개는 지표면으로부터 80cm 유기된 상태임.<그림 31>
- ✓ 굴착 결과 일부 저장조는 원형(초기상태) 대비 1/3수준으로 눌러 있으며 모든 저장조에 우수가 침투되어 있는 상태로 우수와 침출수가 주변 토양으로 유출되어 토양 오염이 진행됨.



<그림 31> LLDPE 저장조 현황 (○시)

- ✓ 가금류 살처분 시 마대를 사용하여 살처분한 경우가 있으며, 저장조 내부에서 사체 분해 발생시 발생하는 유분등 이물질에 의해 마대의 공극이 막혀 밀폐된 상태로 부속이 지연됨.<그림 32>
- ✓ 사용된 마대는 침출수 및 침투된 토사등으로 인해 건조 시간이 오래 걸리며 악취 민원등으로 인해 자연 건조는 사실상 불가능함.
- ✓ 마대 소각 중 발생하는 악취로 소각에 어려움이 발생됨.



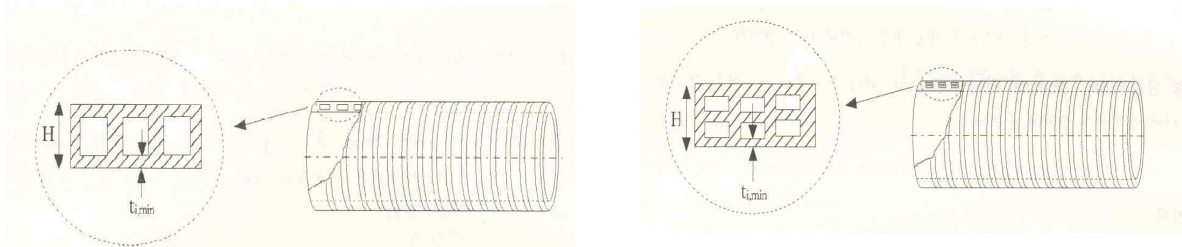
<그림 32> 가축살처분 시 매대사용

## 2) 기존 가축사체 매몰용 저장조의 물리·화학적 특성 실험

### (1) 유사 기준을 적용하여 실험 항목 도출

- 배수 및 하수용 비압력 매설용 구조형 폴리에틸렌(PE)관(이중벽) M3500-1

- ✓ 이 표준은 비 압력 조건에서 매설용으로 사용하는 배수 및 하수용 구조형 폴리에틸렌(PE) 이중벽관에 대하여 규정
- ✓ 이 표준에서 적용하는 관의 관벽은 외압에 견딜 수 있도록 설계된 구조형이어야 하며, 관의 내·외면이 평활한 구조
- ✓ 원료의 특성, 관의 치수 및 공칭 원강성에 따른 등급 분류 등에 대하여 규정하고, 지하 매설 시 외부 영향에 따라 관이 충족하여야 할 물성에 대하여 규정 함.



<그림 33> 이중벽관(DP) 및 다중벽관(MP) 구조

- ✓ 관이나 부속을 생산하는데 사용되는 재료는 폴리에틸렌 컴파운드와 그에 상응하는 폴리에틸렌 및 첨가제를 이용하여 제조되어야 하며, 표 1의 품질 기준을 만족하여야 한다.

시험 항목	단위	품질기준	시험조건	시험방법
용융질량흐름지수(MFR)	g/10min	1.6 이하	190 ℃, 5 kg	KS M ISO 1133
밀도	g/cm <sup>3</sup>	0.941 이상	23 ℃	KS M ISO 1183
항복인장강도	MPa	20 이상	(50±10) mm/min	KS M ISO 1872-2
파단신장률	%	500 이상		
회분시험(1)	wt. %	0.10 이하	(850±50) ℃	KS M ISO 3451-1
카본블랙함량(2)	wt. %	2.0 ~ 3.0	500 ℃	ISO 6964
열안정성(OIT)	분	20 이상	(200±0.5) ℃	KS M ISO TR 10837
내후성-폭로후신장율(3)	%	350 이상	3.5 GJ/m <sup>2</sup>	KS M 3006
최소요구강도(MRS)	MPa	8.0 이상	20 ℃, 50 년	ISO 9080
NCLS	시간	24 이상	-	ASTM F 2136

주 (1) 회분 시험은 흑색 관에 한하여 적용함.

(2) 카본블랙함량은 유색관일 경우 적용하지 않으며 흑색 이외의 색상을 사용한 경우에는 자외선에 노출 시 노화방지를 위한 적절한 재료를 사용하여야 함.

(3) 폭로 후 신장률 시험은 옥외에 장기 야적에 의한 관의 성능 저하를 줄이기 위하여 첨가한 자외선 안정제의 효과를 확인할 수 있다. 카본 블랙을 함유한 흑색관은 이 시험을 실시하지 않아도 됨.

※ 최소요구강도는 압력관에 사용되는 원료에 적용하는 시험

※ 내후성-폭로 후 신장율은 3.5GJ/m<sup>2</sup>에 대한 정확한 근거가 없어 논란의 가능성이 있음

※ NCLS의 시험결과는 시료에 대한 분별력이 낮음

- 재활용 폴리에틸렌 정화조 구성 부품 - 제1부 : 일체형 KS M 3604-1
- 재활용 폴리에틸렌 정화조 구성 부품 - 제2부 : 접합형 KS M 3604-2

재활용 폴리에틸렌(PE) 재료의 품질

시험 항목	단위	품질 기준	시험 방법	
인장 강도	N/mm <sup>2</sup>	12.0 이상	KS M ISO 527-2	
굽곡 강도	N/mm <sup>2</sup>	16.0 이상	KS M ISO 178	
아이조드 충격 강도	J/m <sup>2</sup>	5.0x10 <sup>3</sup> 이상	KS M ISO 180	
내약품성	물	mg/cm <sup>2</sup>	±0.5	KS M ISO 175
	수산화나트륨			
	질산			
	차아염소산나트륨			
	암모니아			

- 유리 섬유 강화 플라스틱 정화조 구성 부품 KS F 4803

✓ 정화조 구성 부품의 내약품성의 기준은 아래와 같으며 인장강도 및 굽힘강도의 품질기준은 섬유 강화 플라스틱용 액상 불포화 폴리에스테르 수지 KS M 3305 에 따름

시험 항목	단위	품질 기준	시험 방법	
인장 강도	MPa	270 이상	KS M ISO 527	
압축강도	MPa	230 이상	KS M ISO 14126	
내약품성	물	mg/cm <sup>2</sup>	±2.0	KS M ISO 175
	수산화나트륨			
	질산			
	차아염소산나트륨			
	암모니아			

※ 인장강도, 휨강도, 압축강도는 적층판(경화제를 배합한 수지액을 섬유 강화재에 함침, 적층하여 경화)기준

(2) 기존 가축사체 매몰용 저장조 재질의 물리적 특성 실험

- ✓ 현재 사용된 LLDPE재질 1종류, HDPE 재질 2종류 그리고 FRP재질 5종류의 가축 사체 매몰용 저장조를 실험함.
- ✓ 가축사체 매몰용 저장조와 유사기준인 폴리에틸렌 이중벽구조 탱크에 대한 시험항 목과 재활용 폴리에틸렌 재료의 물리적 실험을 적용함

구분	단위
인장강도	MPa
굽힘강도	N/mm <sup>2</sup>
압축강도	MPa
인장파단변형	%
회분	%
아이조드충격 강도	kJ/m <sup>2</sup>
굴곡강도	MPa
밀도	g/cm <sup>3</sup>
수지함량	%
열안정성	min

구분	FRP1	FRP2	FRP3	FRP4	FRP5
인장강도 (MPa)	-	87.5	-	308	388
굽힘강도 (N/mm <sup>2</sup> )	측정불가	134	측정불가	501	524
압축강도 (MPa)	99.5	138	116	89.6	95.2
회분 (%)	44.1	30.5	28.6	64	63
아이조드충격 강도 (kJ/m <sup>2</sup> )	81	79	27	NB	NB
밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	1.45	1.38	1.32	1.71	1.84
열안정성 (min)	20이상	20이상	20이상	20이상	20이상
수지함량 (%)	64.8	69.8	73.3	40.6	40.3
두께 (mm)	10±1	10±1	7±1	6±1	10±1

- ✓ FRP 1, 2, 3은 제조방식이 Hand lay up 방식이며 FRP 4, 5의 경우 Filament winding 방식으로 제조 됨.
- ✓ hand lay up 방식으로 제조된 가축사체용 저장조는 두께가 일정치 않고 FRP내에 공극이 존재하여 인장강도 및 굽힘강도를 측정할 수 없었음.

구분	LLDPE	HDPE1	HDPE2
인장강도 (MPa)	24.8	25.0	18.4
인장파단변형 (%)	323	549	317
회분 (%)	0.11	0.1	0.54
아이조드충격 강도 (Mpa)	8.5	19	12
굴곡강도 (MPa)	17.9	13.6	22.2
밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	0.924	0.954	0.954
열안정성 (min)	-	20이상	20이상
카본블랙 (%)	-	2.0	0.2
두께 (mm)	5	7	6

✓ PE재질의 경우 FRP시료와 달리 단면이 일정하고 공극이 없어 균질한 형태를 나타냄.

• 기존 가축사체 매몰용 저장조 재질의 화학적 특성 실험

- ✓ 일반적으로 PE, PP는 내약품성이 우수함.
- ✓ 매몰용 저장조의 경우 소독제 또는 석회 등을 사용하기에 화학적 안정성을 고려해야함.
- ✓ 재활용 정화조의 경우 내약품성의 필요성이 인정되어 실험기준이 있어 KS M 3604을 이용하여 화학적 실험을 진행 함.
- ✓ 위의 필요를 검토하기 위하여 아래와 같이 검토하였음.
- ✓ 정화조 내약품성 품질기준 중 칸막이 및 그 밖의 부분중 FRP재질은 질량변화율을 2.0% 이내로 규정하고 있으며 FRP모두 2.0% 이내로 나타남.

질량변화율(%)

구분	내산성(질산)	내알칼리성(수산화나트륨)
FRP1	0.8	1.5
FRP2	0.4	0.4
FRP3	1.5	0.7
FRP4	0.3	0.3
FRP5	0.6	0.9



- 매몰용 저장조의 강성 실험

- ✓ 기존 가축사체 매몰용 저장조의 강도 실험을 실시함 저장조의 원통 방향 시료의 하중을 측정(KS M ISO 9969 준용).
- ✓ 원연성실험(KS M SO 13968 준용)을 실시하여 약 17%까지 변형을 및 변형시 하중을 측정 함.

- HDPE(High density polyethylene) 강성 실험



구분	두께 (mm)	원강성 (kN/m <sup>2</sup> )	변형율 (%)	최대변형시 하중 (kgf)
시료 1	56.0	53.7	17.0	216.0
시료 2	58.0	50.5	17.3	204.0
시료 3	57.5	53.0	16.9	204.0
평균	57.2	52.4	17.1	208

- ✓ 원강성이 비교적 균일하게 나왔으며 평균적으로 52.4 kN/m<sup>2</sup>으로 나타남
- ✓ 하중을 받아 매몰용 저장조가 변형되는 변형율을 측정하였으며 직경의 17.3%까지 변형하였으나 파손이 나타나지는 않음.
- ✓ 재질의 물리적 특성상 FRP에 비해서 인장강도 및 아이조드 충격강도가 낮으나 성형된 관의 구조가 이중격벽 구조로 되어 있어 저장조의 강성실험 결과 원강성이 평균 52.4 kN/m<sup>2</sup> 으로 높게 나타남.

- FRP(Fiberglass Reinforced Plastic) 강성 실험 (Filamet winding)



구분	두께 (mm)	원강성 (kN/m <sup>2</sup> )	변형율 (%)	최대변형시 하중 (kgf)
시료 1	11.0	77.1	18.3	423.0
시료 2	13.0	51.2	18.0	267.0
시료 3	9.0	20.5	16.3	75.0
평균	11.0	49.6	17.5	255.0

- ✓ 시료의 원강성의 차이가 크며 평균적으로 49.6 kN/m<sup>2</sup>으로 나타남
- ✓ 하중을 받아 매물용 저장조가 변형되는 변형율을 측정하였으며 직경의 18.3%까지 변형하였으나 파손이 나타나지는 않음.

- FRP(Fiberglass Reinforced Plastic) 강성 실험 (Hand lay up)



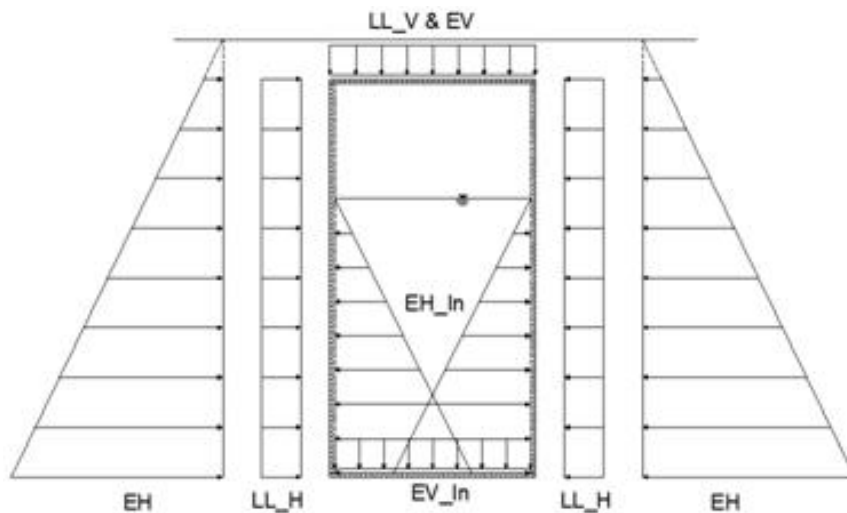
- ✓ 저장조의 자중으로 인해 처짐이 발생하며 반발력이 약해 실험이 불가함

- 강성실험 분석결과

- ✓ HDPE 재질의 매몰용 저장조의 원강성이 일정하게 나타났으며 평균 52.4 kN/m<sup>2</sup>으로 가장 높게 나타남.
- ✓ Filament winding 방식으로 제조된 저장조도 평균 49.6 kN/m<sup>2</sup>으로 나타났으나 최대 77.1 최소 20.5 kN/m<sup>2</sup>으로 편차가 크게 나타남
- ✓ 두께 11mm에서 최대 77.1kN/m<sup>2</sup>으로 나타났으나 두께보다는 다른영향으로 편차가 생긴 것으로 사료됨.
- ✓ Hand lay up 방식으로 제조된 경우 자중으로 인해 처지는 현상이 발생하며 하중을 가하였을 경우 반발력이 측정기계 이하로 실험이 되지 않음.

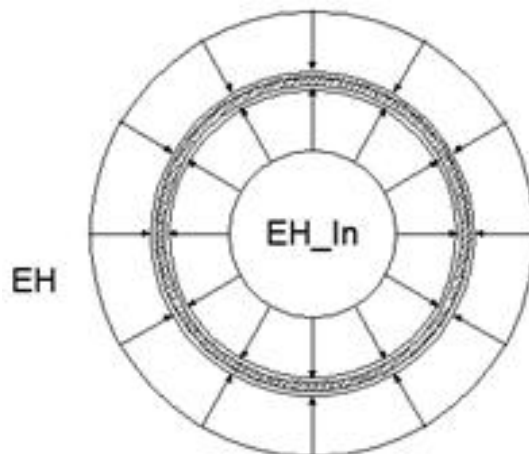
### 3) 기존 가축사체 매몰용 저장조의 문제점 보완 사항 도출

- ✓ 기존 가축사체 매몰용 저장조의 물리적 특성 실험 결과를 바탕으로 수직형 및 수평형 매몰용 저장조의 구조해석을 실시함.
- ✓ 구조해석용 프로그램인 LUCAS의 3차원 Shell를 사용하였으며 본체와 지반이 접하는 부분은 연직지반반력계수를 스프링으로 모델링을 함.
- ✓ 유사한 매설관으로 가정하여 도로교 설계예제집(한계상태설계법)을 적용하여 활하중(3등교)을 적용함.
- ✓ 매몰용 저장조 용기현상을 해석하고자 부력검토 시 지하수위를 지표면으로 가정하는 극한상태로 적용함.

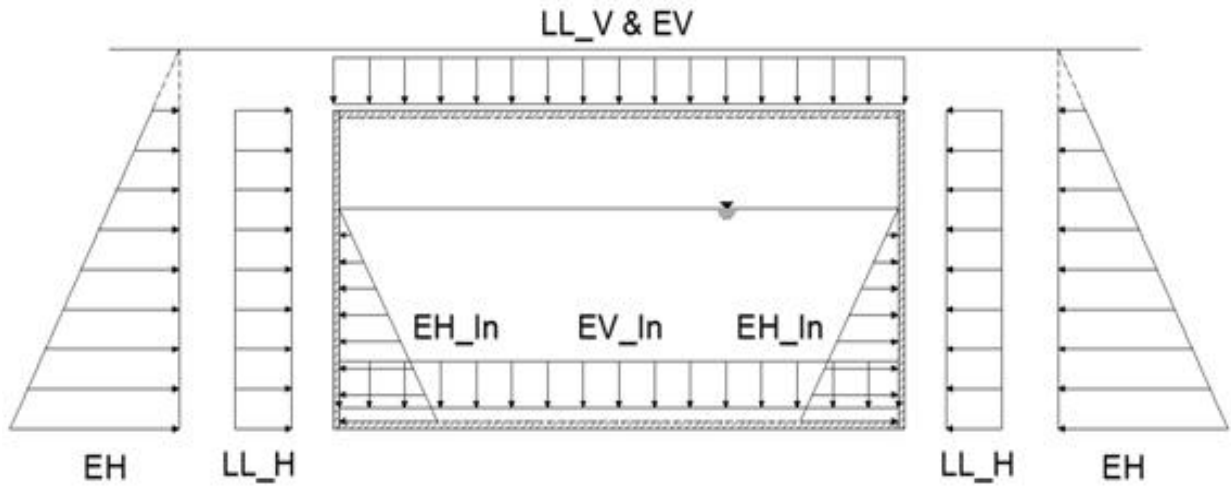


<그림 34> 세로매설형 하중 재하도(정면)

EH : 토압, EV : 연직토압, LL : 활하중, EV\_In : 내부압력하중(연직), EH\_In : 내부압력하중(수평)

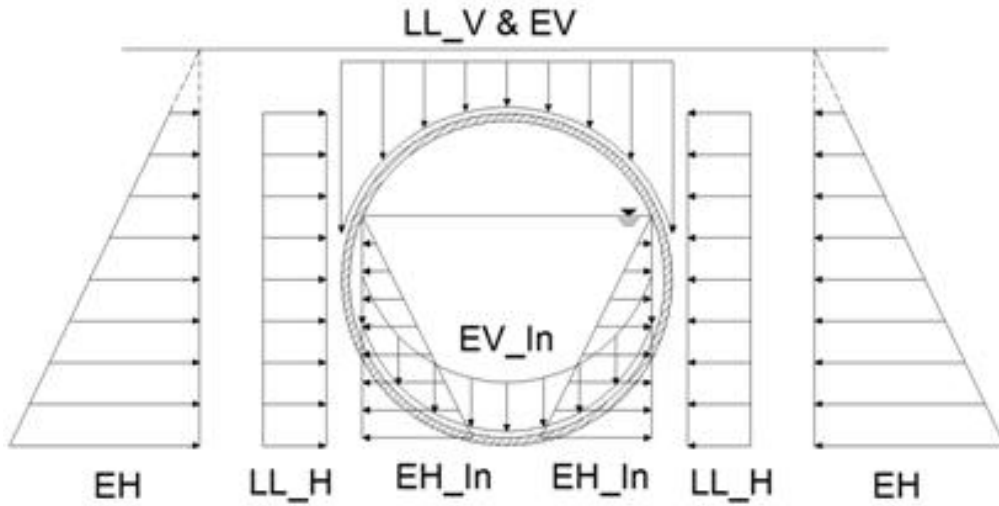


<그림 35> 세로매설형 하중 재하도(평면)



<그림 36> 가로매설형 하중 재하도(정면)

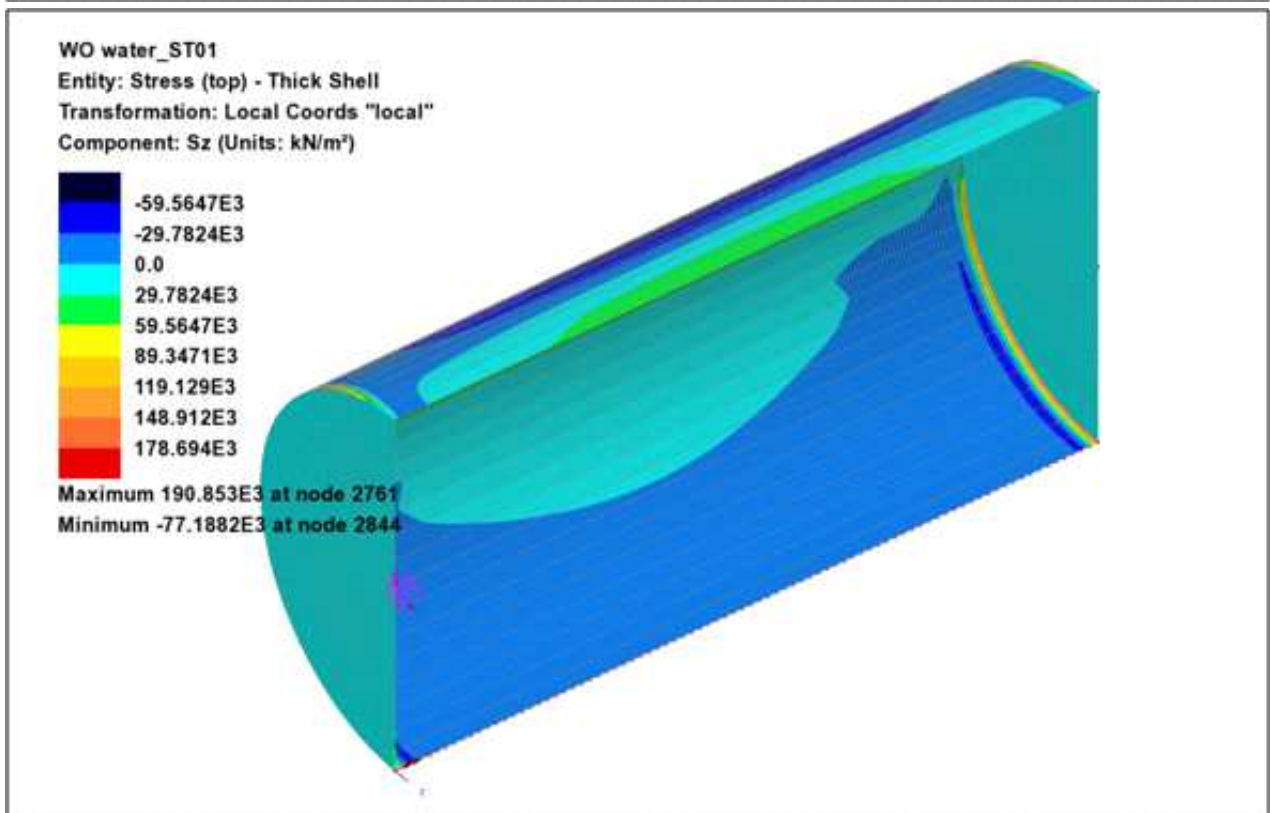
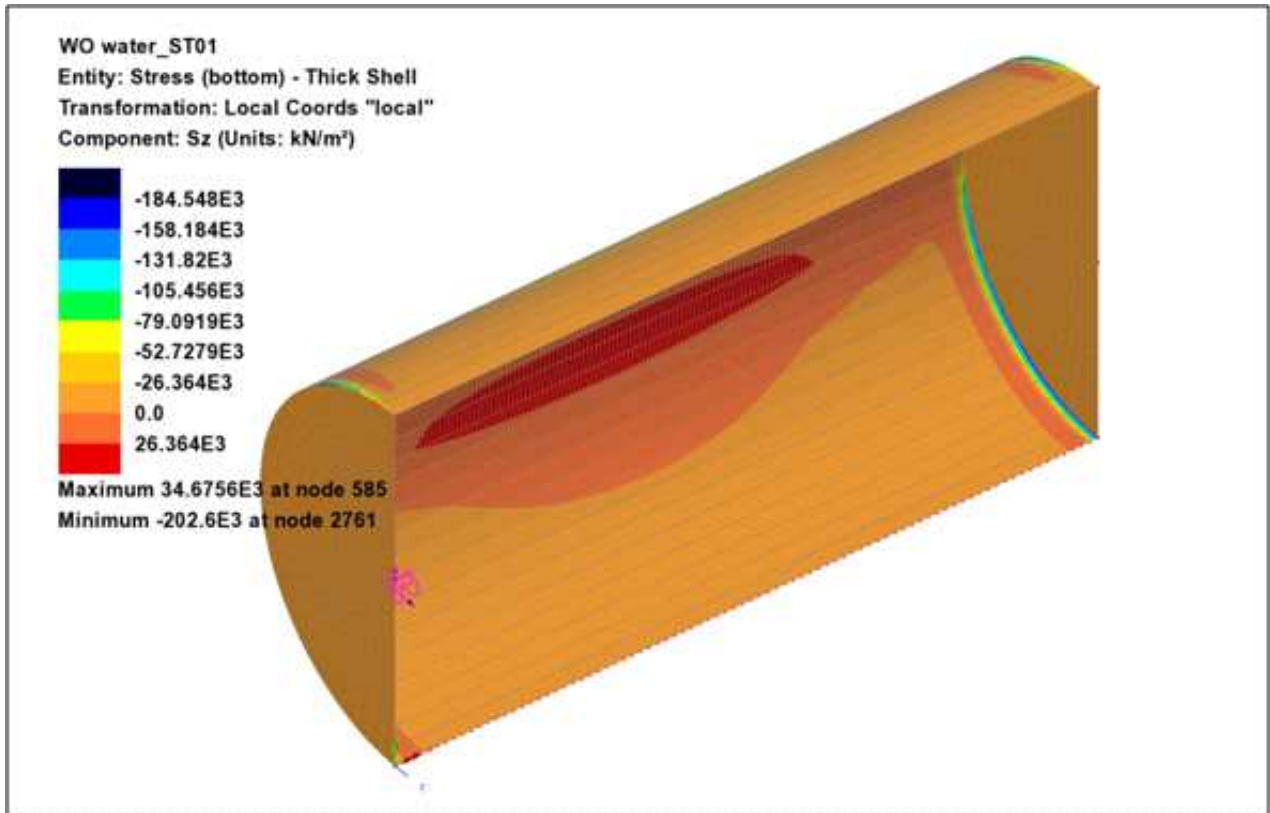
EH : 토압, EV : 연직토압, LL : 활하중, EV\_In : 내부압력하중(연직), EH\_In : 내부압력하중(수평)



<그림 37> 가로매설형 하중 재하도(측면)

# (1) FRP 적용 결과

- 가로형



- 응력 검토

극한한계상태	최대발생압축력	허용압축력	최대발생인장력	허용인장력	비고
	190.9	95.2	202.6	388.0	불안전

- 지지력 검토

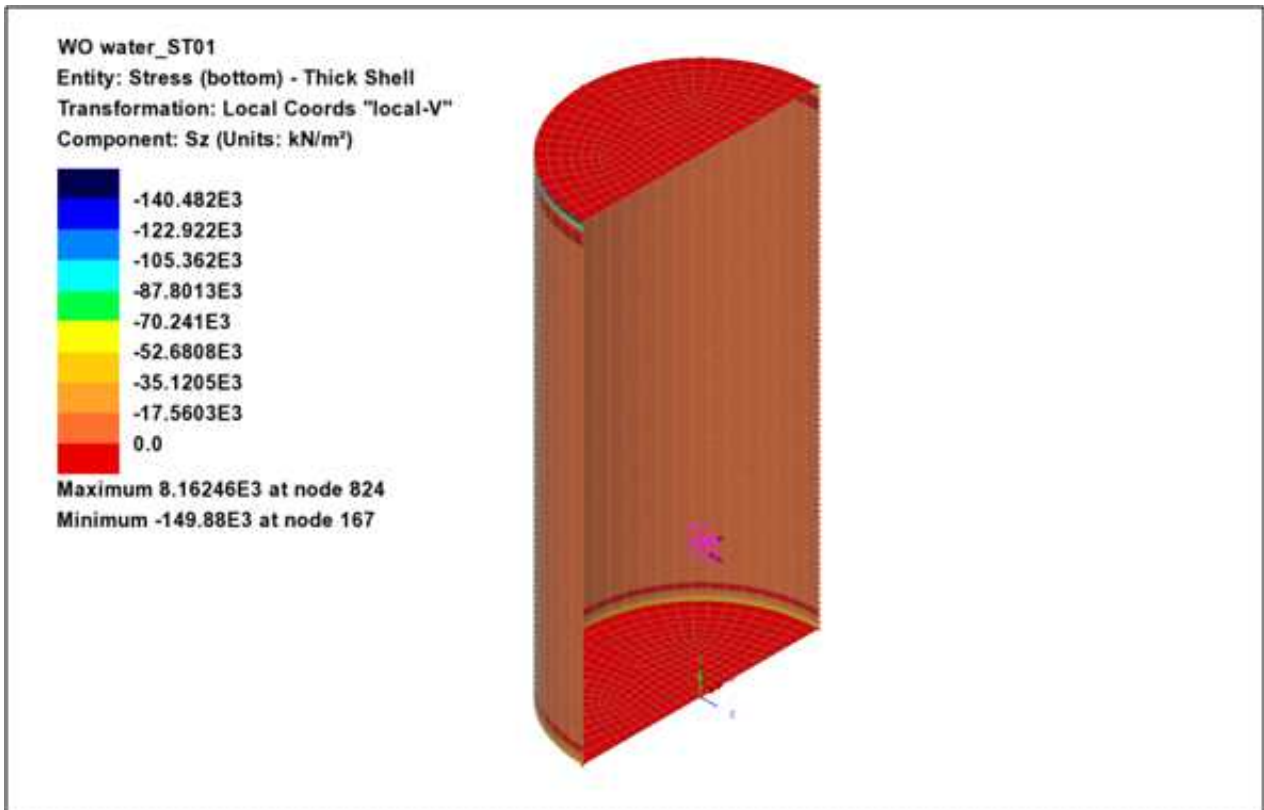
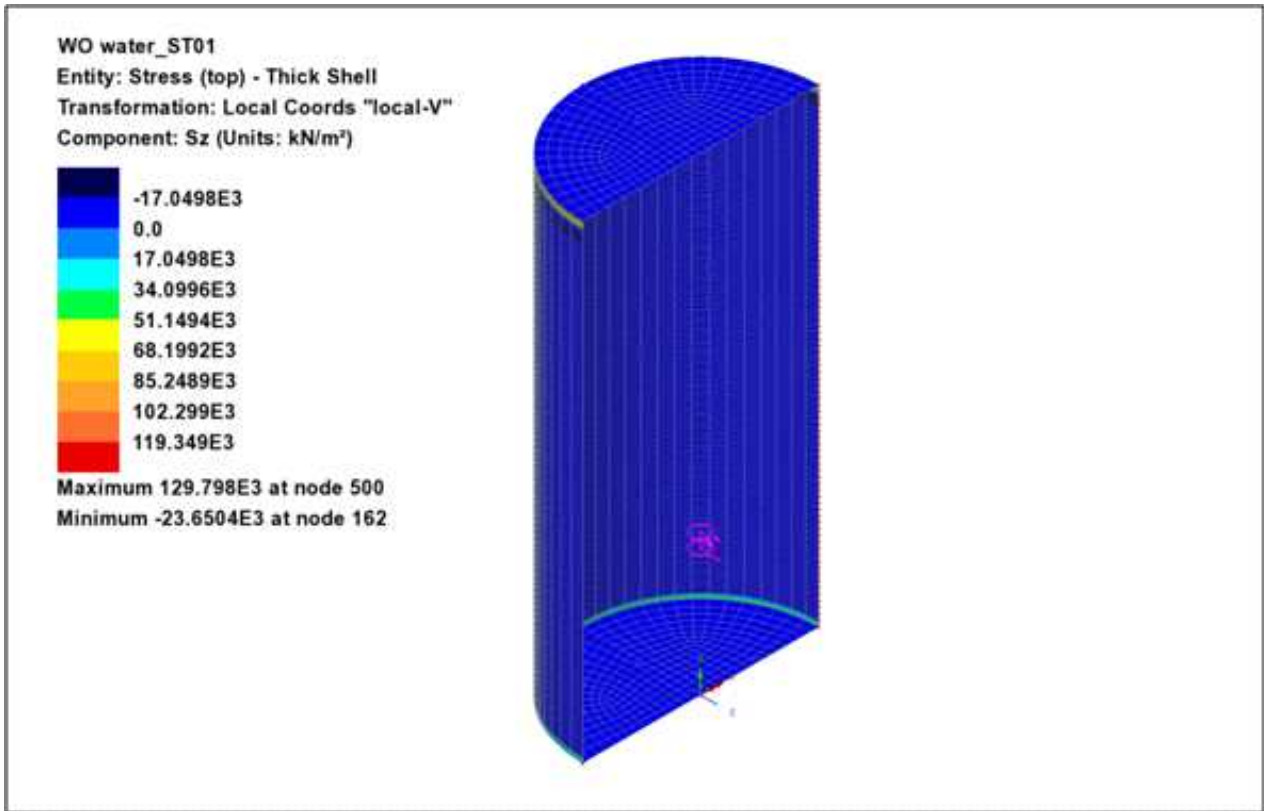
구분	최대발생지지력	허용지지력	비고
극한한계상태	98.4	161.86	안전
극단상황한계상태	21.8	359.68	안전
사용한계상태	60.8	359.68	안전

- 부력검토

$$F_s = R / U = 67.34/75.0$$

$$= 0.902 < 1.2 \text{ 부력방지 대책 필요}$$

- 수직형





- 응력 검토

극한한계상태	최대발생압축력	허용압축력	최대발생인장력	허용인장력	비고
	129.8	95.2	149.9	388.0	불안전

- 지지력 검토

구분	최대발생지지력	허용지지력	비고
극한한계상태	132.2	233.9	안전
극단상황한계상태	48.0	359.7	안전
사용한계상태	87.0	359.7	안전

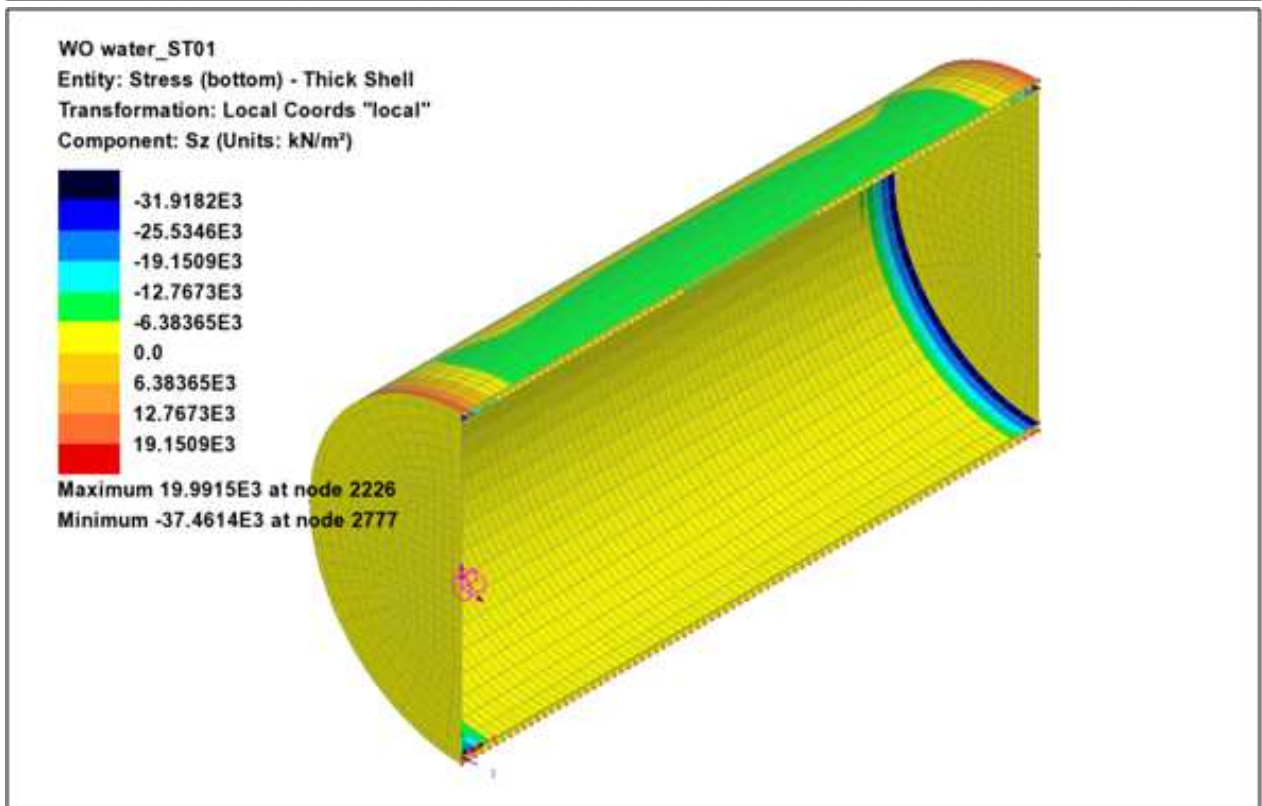
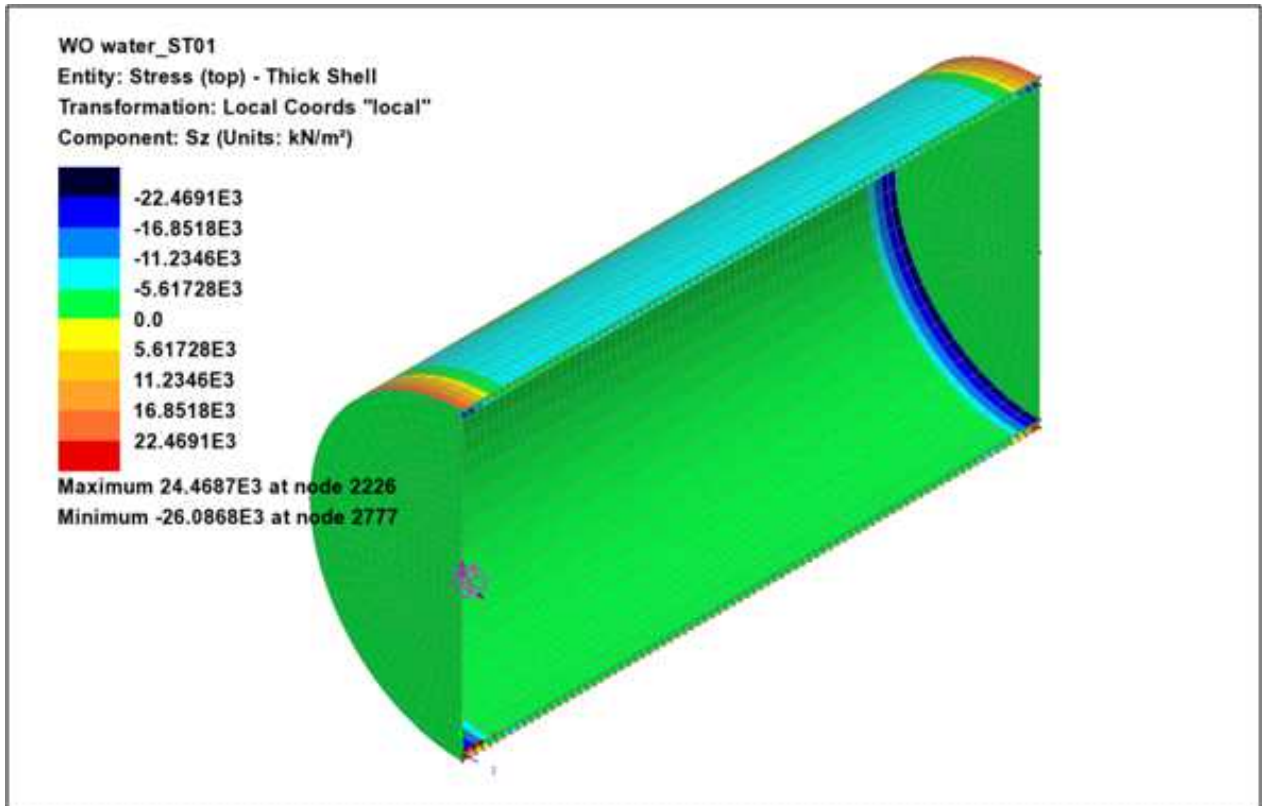
- 부력검토

$$F_s = R / U = 134.8 / 137.5$$

$$= 0.980 < 1.2 \text{ 부력방지 대책 필요}$$

## (2) HDPE

- 가로형



- 응력 검토

극한한계상태	최대발생압축력	허용압축력	최대발생인장력	허용인장력	비고
	24.5	18.4	37.5	18.4	불안전

- 지지력 검토

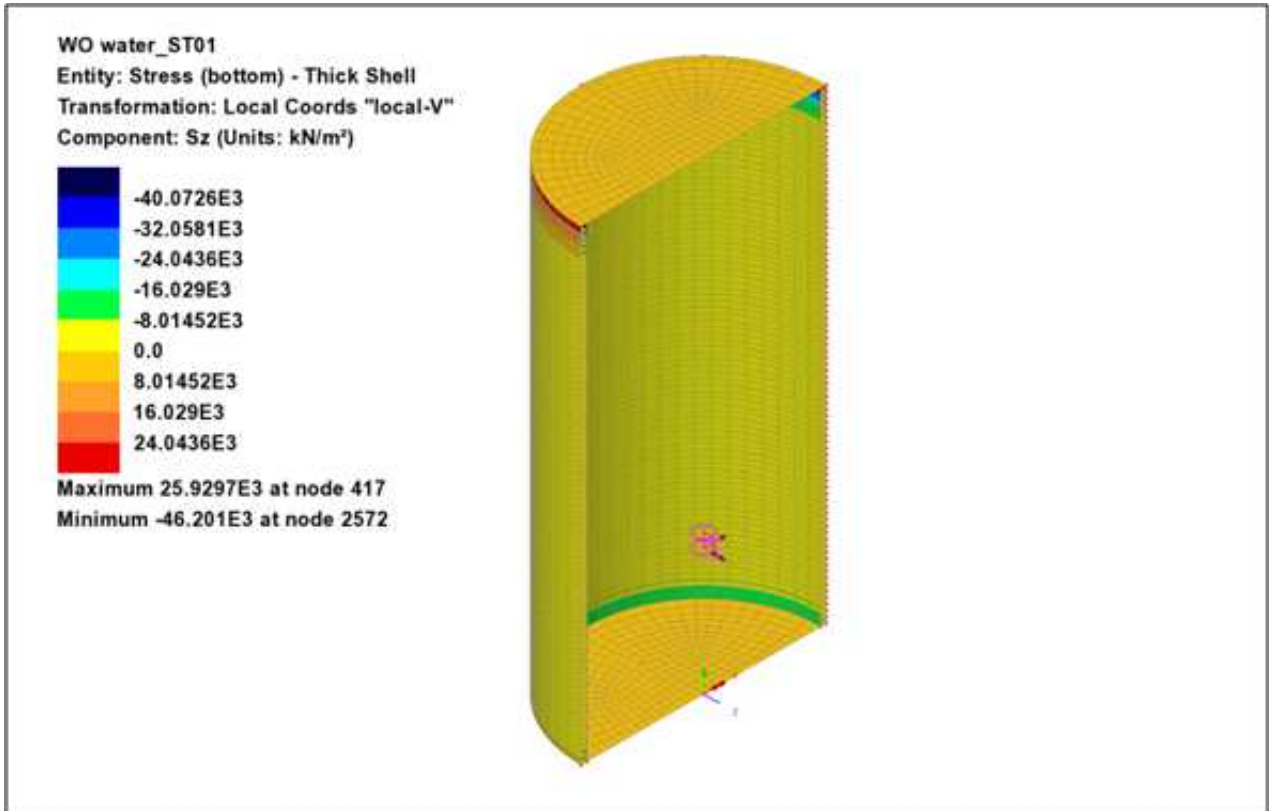
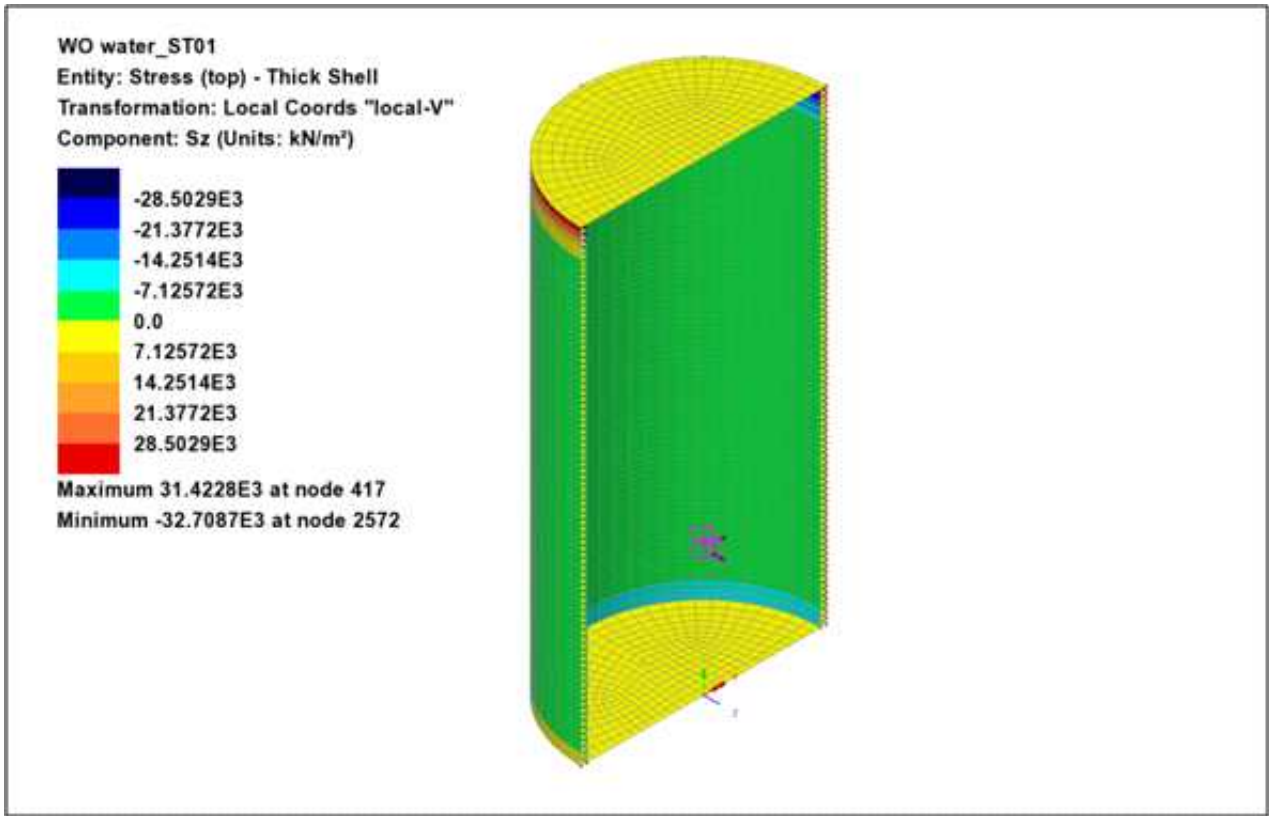
구분	최대발생지지력	허용지지력	비고
극한한계상태	96.4	161.86	안전
극단상황한계상태	20.2	359.68	안전
사용한계상태	59.231	359.68	안전

- 부력검토

$$F_s = R / U = 63.7/75.0$$

$$= 0.849 < 1.2 \text{ 부력방지 대책 필요}$$

- 수직형



- 응력 검토

극한한계상태	최대발생압축력	허용압축력	최대발생인장력	허용인장력	비고
	31.4	18.4	46.2	18.4	불안전

- 지지력 검토

구분	최대발생지지력	허용지지력	비고
극한한계상태	127.4	233.9	안전
극단상황한계상태	44.2	359.7	안전
사용한계상태	83.2	359.7	안전

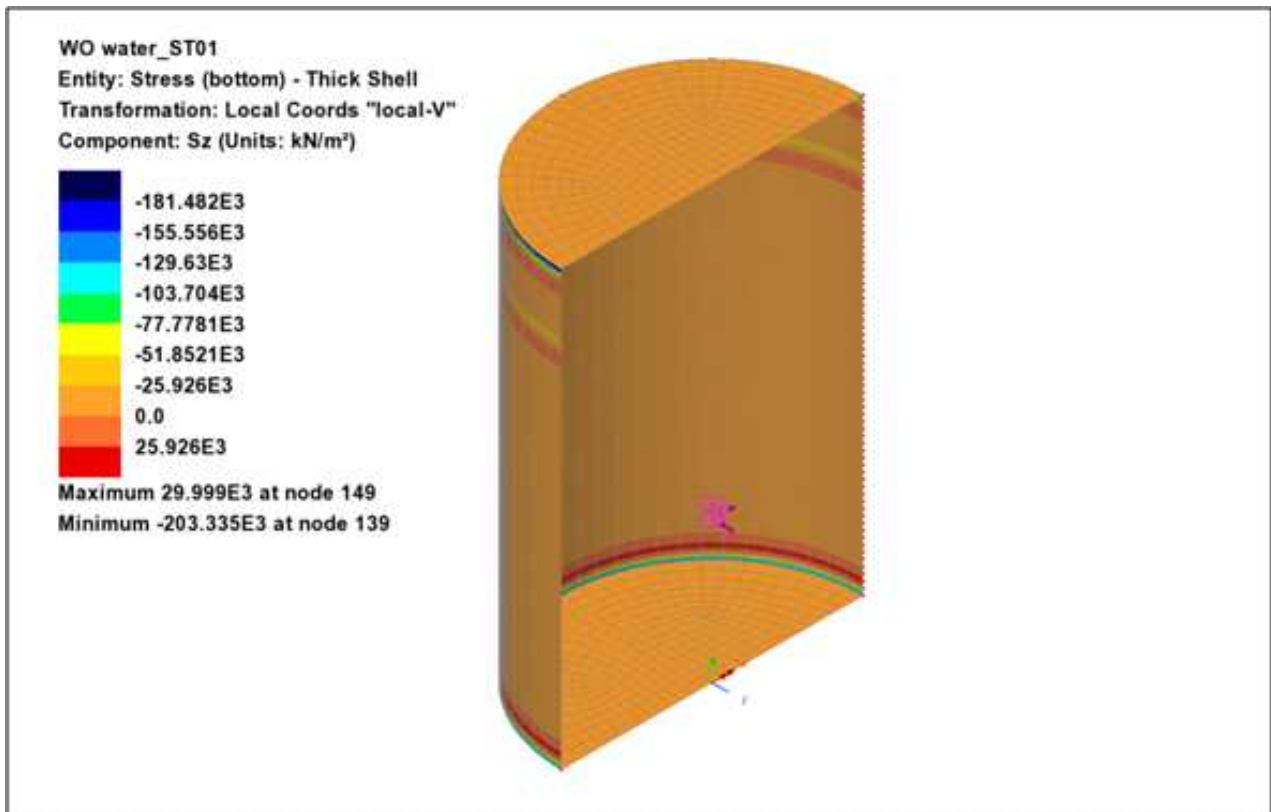
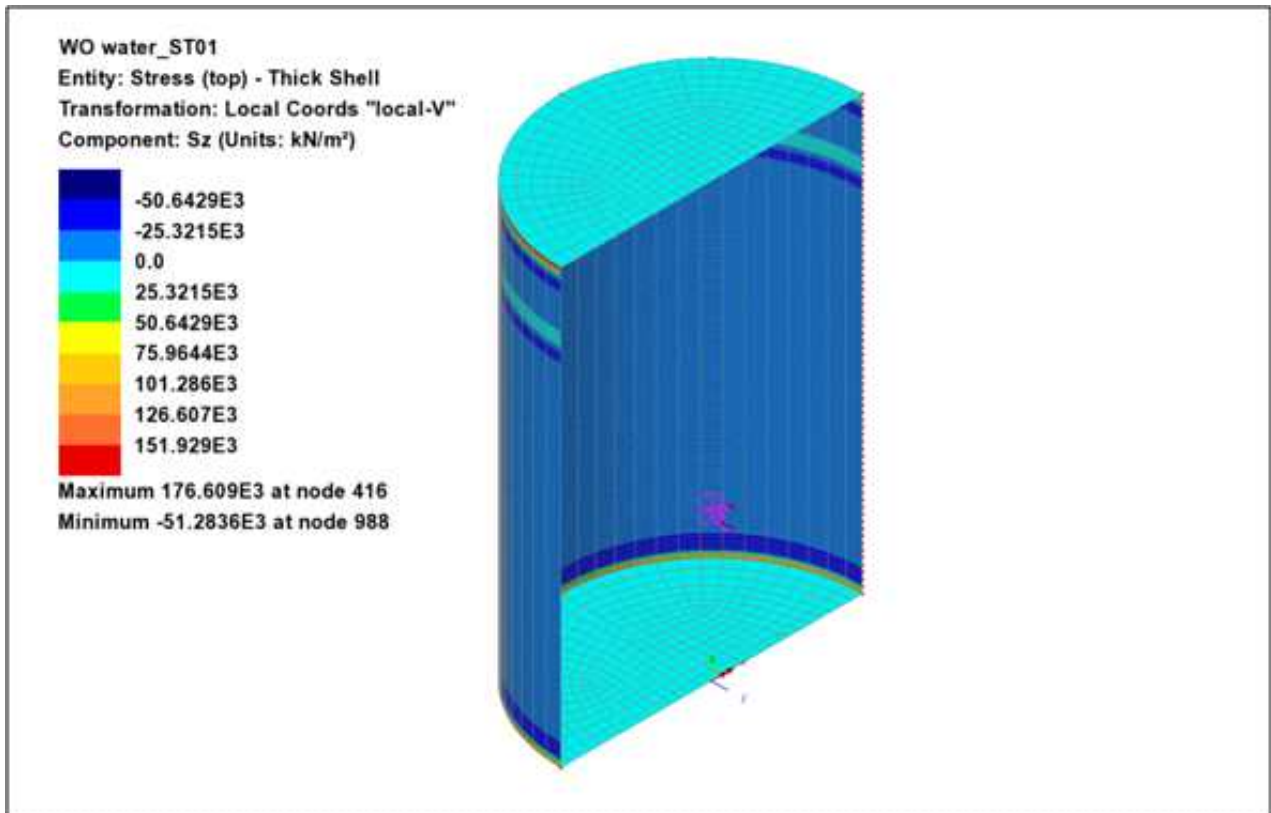
- 부력검토

$$F_s = R / U = 124.6 / 137.5$$

$$= 0.906 < 1.2 \text{ 부력방지 대책 필요}$$

### (3) LLDPE

LLDPE의 경우 물탱크로 사용되고 있는 것을 이용하여 매몰하였으며 형태는 수직형만 존재 함



- 응력 검토

극한한계상태	최대발생압축력	허용압축력	최대발생인장력	허용인장력	비고
	176.6	24.8	203.3	24.8	불안전

- 지지력 검토

구분	최대발생지지력	허용지지력	비고
극한한계상태	126.7	220.9	안전
극단상황한계상태	43.6	490.9	안전
사용한계상태	82.6	490.9	안전

- 부력검토

$$F_s = R / U = 142.4/133.1$$

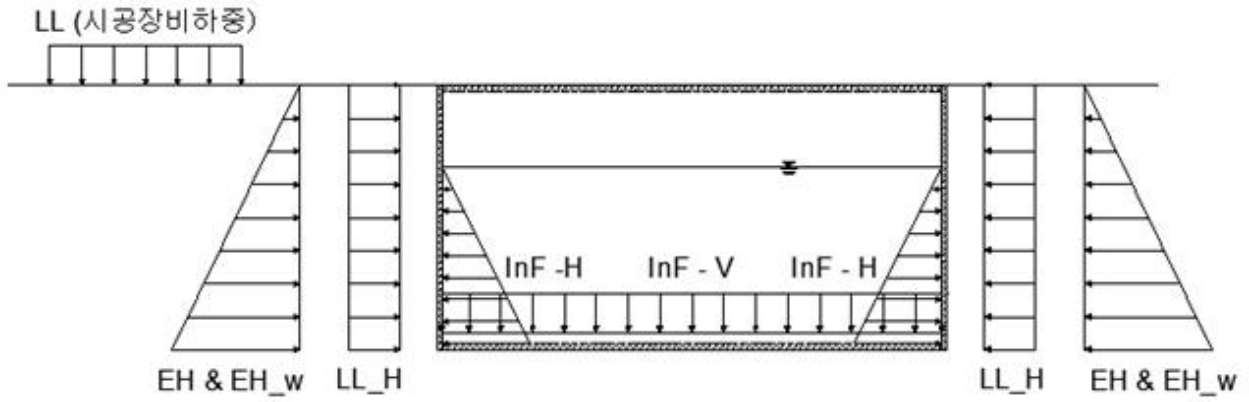
$$= 1.07 < 1.2 \text{ 부력방지 대책 필요}$$

(4) 1차 구조해석 검토결과

- ✓ 현재 사용되고 있는 매몰용 저장조의 재질에 안전성을 구조해석을 통해 살펴봄.
- ✓ FRP, HDPE, LLDPE, 의 소재의 경우 유사한 매설관으로 가정하여 도로교 설계예제 집(한계상태설계법)을 적용해 활하중(3등교)을 적용하였을때 모두 불안정한 것으로 나타남.
- ✓ 특히 LLDPE의 경우 발생하는 한계응력에 비해 허용되는 한계응력이 현저히 낮아 매몰용 저장조의 소재로는 부적합하다 판단됨.
- ✓ 지지력에 대해서는 안전하게 나타났으나 부력에 대해서는 매몰용 저장조 문제점으로 조사된 용기현상을 구현하고자 지하수위를 지표면으로 높게 가정하여 극한상황의 구조해석을 실시함.
- ✓ 현재 SOP상 매몰지 위치선정 조건 중 지하수위는 매몰지 바닥으로부터 지하수위까지 1.0m로 규정되어 있어 저장조 용기는 저장조 위치선정이 잘못된 사례로 사료됨.
- ✓ 위치선정이 규정대로 된다면 용기현상은 없을 것으로 판단됨.
- ✓ 매몰용 저장조의 운영특성상 적용되는 활하중은 매우 작을 것으로 판단되며 다음 구조해석을 통해 필요 단면의 두께를 산정하기로 함.

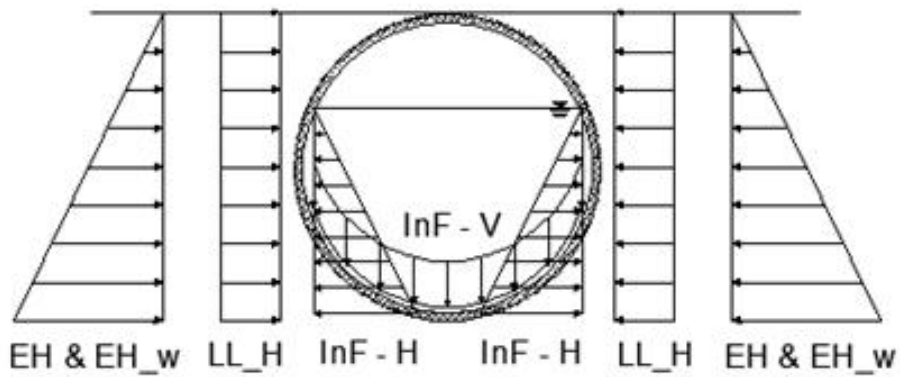
(5) 2차 구조해석으로 최적 단면 도출

- ✓ 구조해석용 프로그램인 LUCAS의 3차원 Shell를 사용하였으며 본체와 지반이 접하는 부분은 연직지반반력계수를 스프링으로 모델링을 함.
- ✓ 매몰용 저장조의 시공 시 사용되는 시공장비의 측면에서 발생하는 하중을 고려하여 상재활하중을 고려함.
- ✓ FRP, HDPE 재질의 매몰용저장조를 대상으로 구조해석하였으며 형태는 사용되고 있는 수평형으로 고려함.

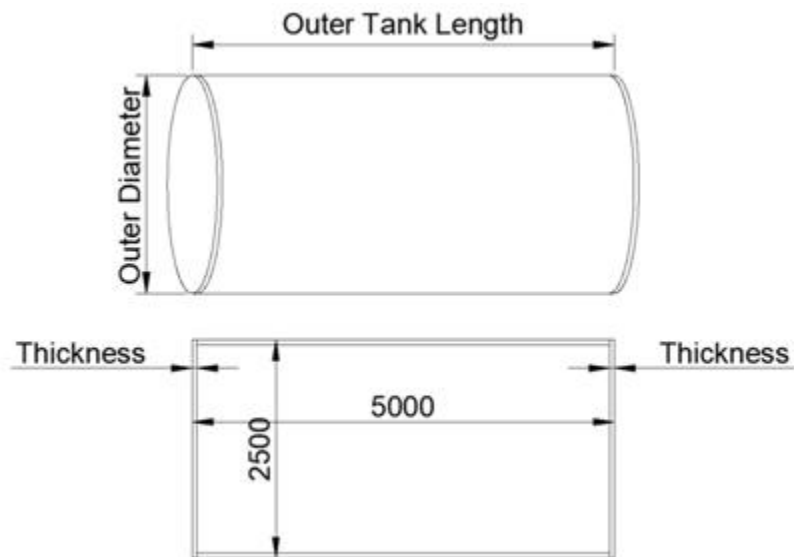


<그림 38> 가로매설형 하중 재하도(정면)

EH : 토압, EV : 연직토압, LL : 활하중, EV\_In : 내부압력하중(연직), EH\_In : 내부압력하중(수평)



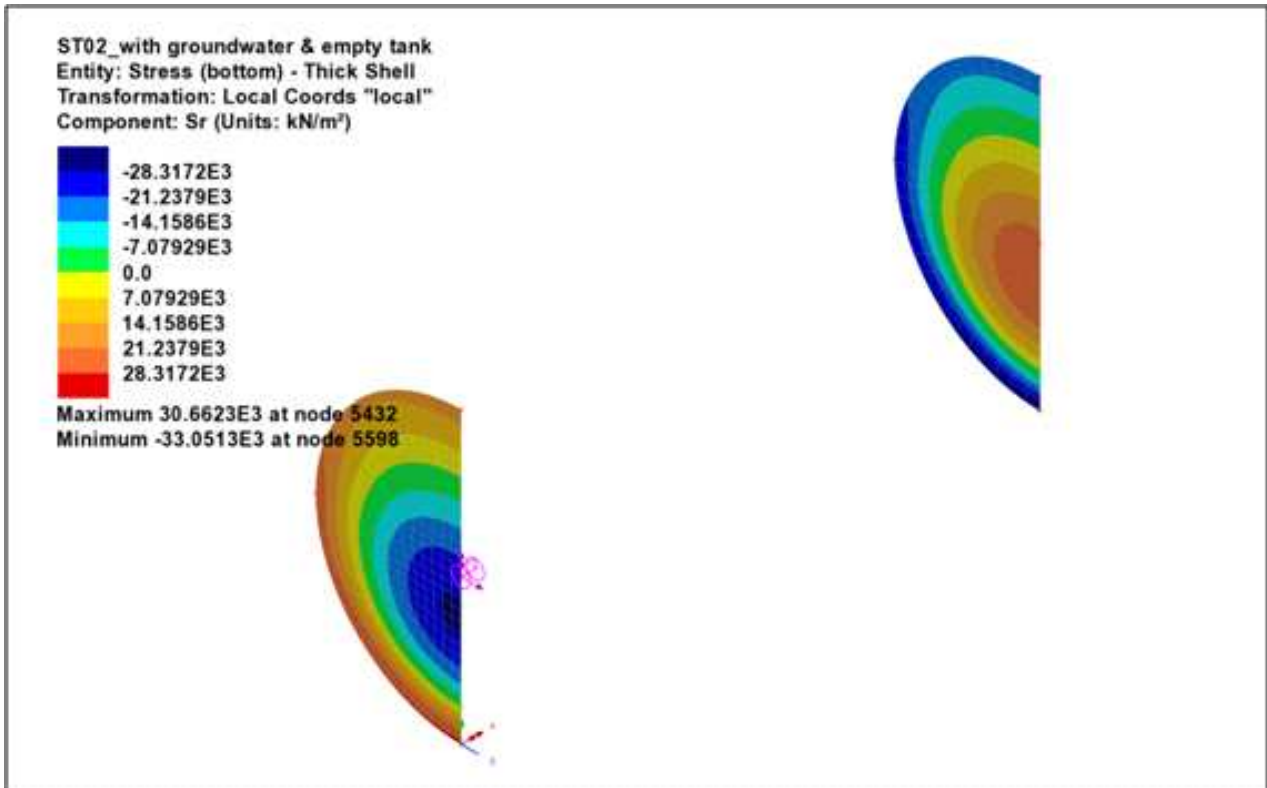
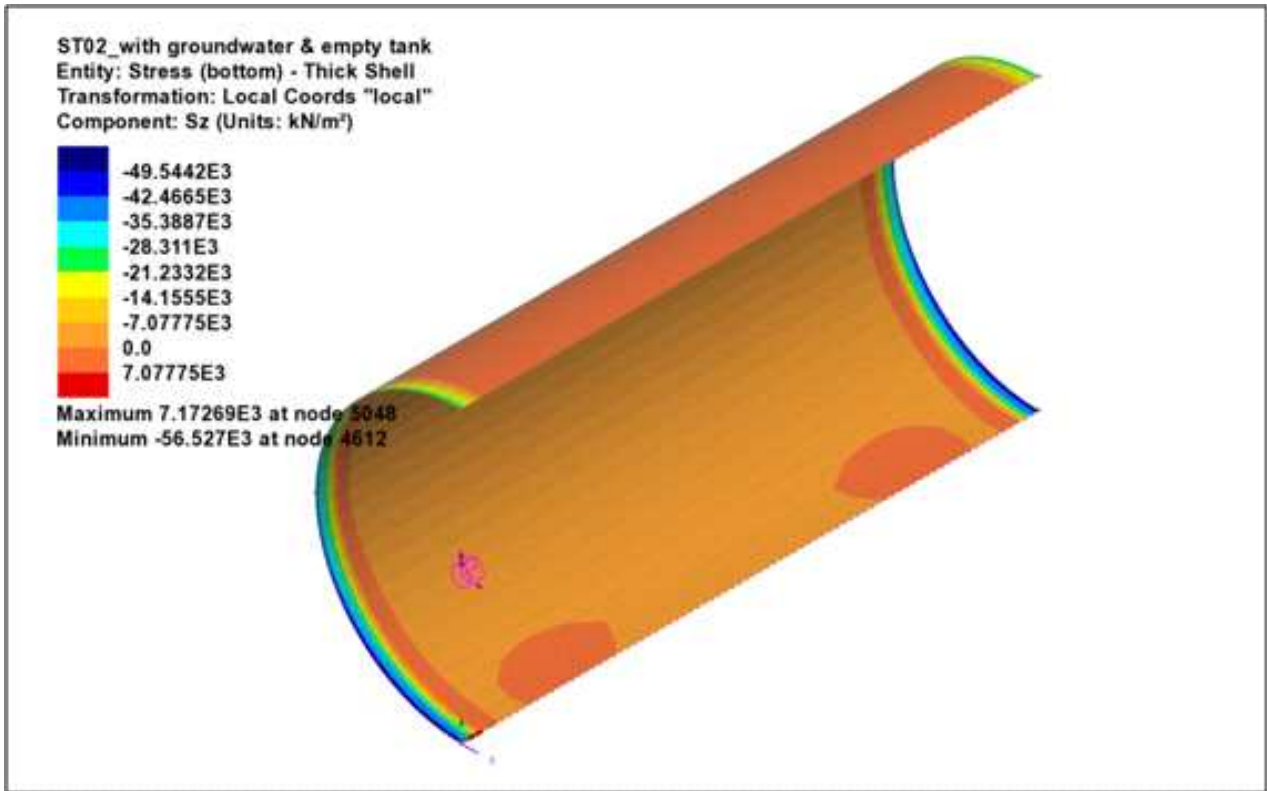
<그림 39> 가로매설형 하중 재하도(측면)



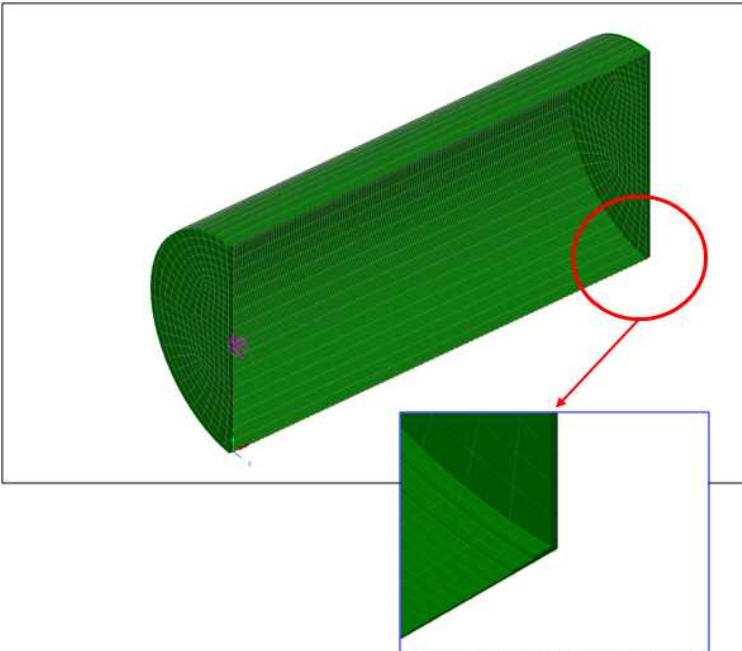
<그림 40> 가로매설형 단면도



- FRP 재질 매몰용 저장조의 단면 도출



• FRP저장조의 단면 보완



- 필요 두께

구분	측면벽체	원통 벽체
두께	20	6

✓ 가축저장조의 양 끝단의 이음새부분은 15mm 로 보강한다

구간	0~6cm	6~12cm	12~
Thickness	15	10	6

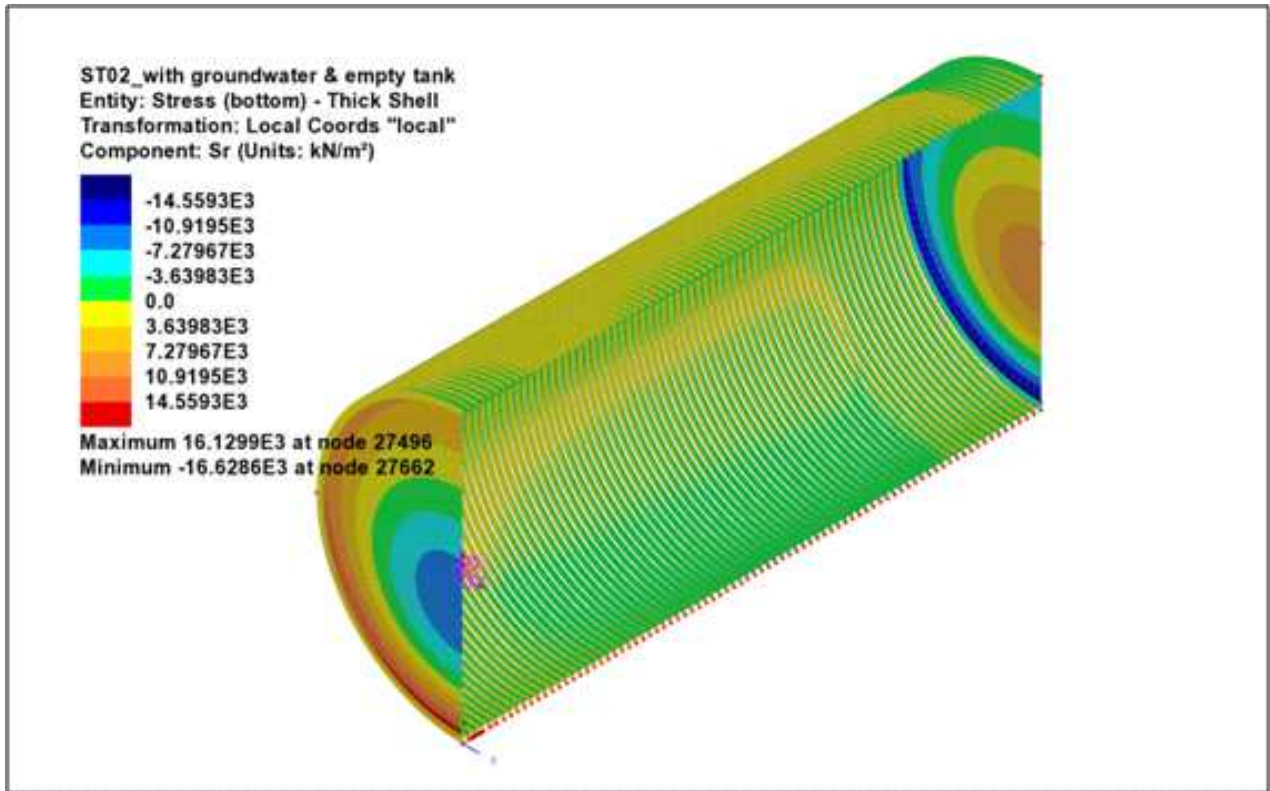
- 응력 검토

극한한계상태	최대발생압축력	허용압축력	최대발생인장력	허용인장력	비고
	56.5	80.0	30.7	300.0	안전

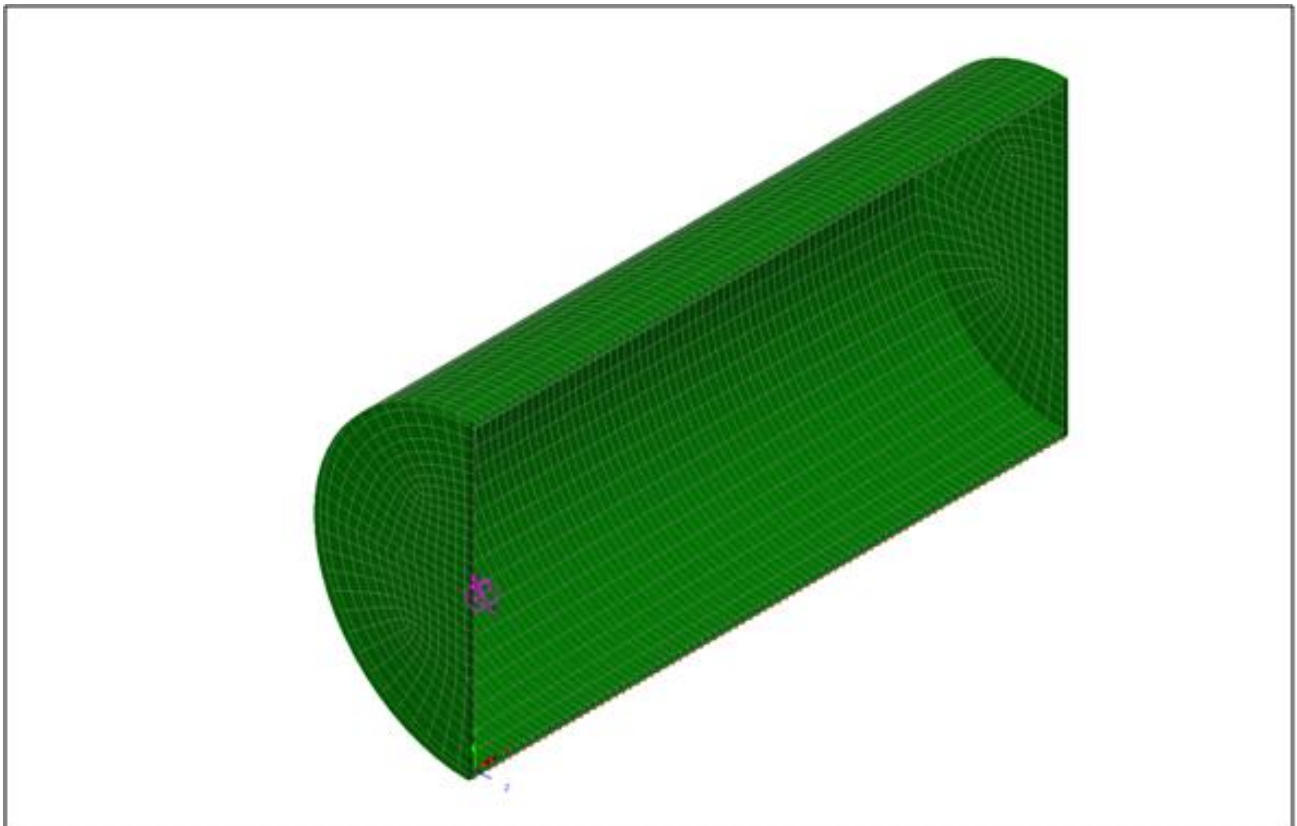
- 지지력 검토

구분	최대발생지지력	허용지지력	비고
극한한계상태	126.7	220.9	안전
극단상황한계상태	43.6	490.9	안전
사용한계상태	82.6	490.9	안전

- HDPE 재질 매몰용 저장조의 단면 도출



- HDPE 저장조의 이중단면

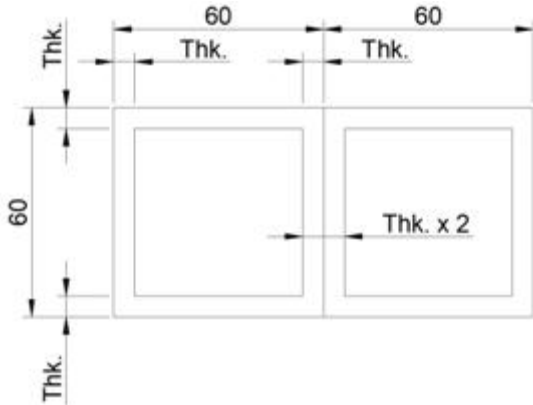


- 단면제원

- 필요 두께

구분	측면벽체	원통 벽체
두께	30	10

- 이중관벽 상세 단면



- 응력 검토

극한한계상태	최대발생압축력	허용압축력	최대발생인장력	허용인장력	비고
	16.6	20.0	16.1	20.0	안전

- 지지력 검토

구분	최대발생지지력	허용지지력	비고
극한한계상태	18.3	144.0	안전
극단상황한계상태	14.1	320.0	안전
사용한계상태	14.1	320.0	안전

#### 4) 저장조의 적정 두께, 강도 및 수밀성 등을 고려한 안전한 저장조 세부기준 확립

### 가축매몰용 저장조 기준(안)

#### 1. 적용범위

이 기준은 매설용으로 사용하는 가축매몰용 저장조에 대하여 규정한다. 이 기준에서 적용하는 저장조의 관벽은 외압에 견딜 수 있도록 설계된 구조형으로, 저장조의 내·외면이 평활한 구조이어야 한다.

**비고** 적절한 요구사항, 관련 법규 및 시공 지침, 시방서를 고려하여 적합한 저장조의 종류를 선택하는 것은 이해 당사자 간의 책임이며, 저장조의 시공 시에는 강성을 충분히 고려하여 시공하여야 한다.

#### 2. 가축매몰용 저장조의 종류

가축매몰용 저장조의 재질은 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)과 HDPE(High density polyethylene)으로 되어있다.

FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)은 Filament winding 공법으로 제작되어야 한다.

#### 3. FRP 저장조의 규격

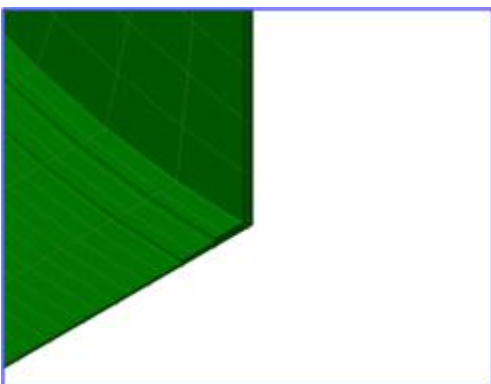
##### (1)FRP 저장조의 크기

- 지름은 2.5m 이하이어야 한다.
- 저장조의 두께는 10±1 mm 이상이어야 한다.

지름(m)	두께(mm)	측벽면 두께(mm)
2.5 이하	10±1 이상	20±1 이상

- 가축저장조의 양 끝단의 이음새부분은 30mm 로 보강한다

구간	0~6cm	6~ cm
Thickness	15	10



**(2) 가축사체 매몰용 저장조 FRP재질의 기준**

보강재의 원재료로 사용되는 유리섬유는 다음의 세 가지 종류를 사용할 수 있으며 아래의 기준을 만족하여야한다.

**E-글라스** 주요 조성이 규소, 알루미늄, 칼슘의 산화물인 아루미노 붕규산염 유리 또는 규소, 알루미늄 카슘규산염유리 중 한 종류일 수 있다.

**C-글라스** 주요 조성이 규소, 나트륨, 칼륨, 칼슘 및 보론의 산화물로 구성된 유리로서 내화학적 강화가 필요한 적용 분야에서 사용하기 위한 조성이다.

**E-CR 글라스** E-글라스 조성에 보론의 산화물이 구성되지 않은 유리로서 내화학적 중에 특히 내산성의 강화가 필요한 적용분야에서 사용하기 위한 조성이다.

구분	측정방법	기준
인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	KS M ISO 527	300 이상
굽힘강도 (N/mm <sup>2</sup> )	KS M 3015	500 이상
압축강도 (MPa)	KS M ISO 527	80 이상
회분 (%)	KS M 3451	60 이상
열안정성 (min)	KS M ISO 6964	20 이상
수지함량 (%)	KS M ISO 1172	40 이상
밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	KS M ISO 1183	1.20 이상

구분	측정방법	기준	
내약 품성	수산화나트륨 mg/cm <sup>2</sup>	KS M ISO 175	±2.0
	질산 mg/cm <sup>2</sup>	KS M ISO 175	±2.0

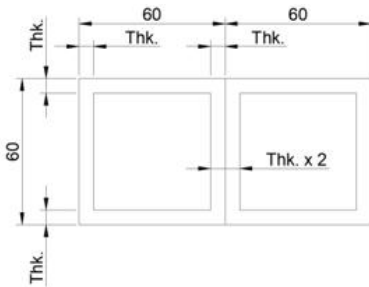
#### 4. HDPE 저장조의 규격

##### (1) HDPE 저장조의 크기

- 지름은 2.5m 이하이어야 한다.
- 저장조의 두께는 10±1 mm 이상이어야 한다.

지름(m)	두께(mm)	측면 두께(mm)
2.5 이하	10±1 이상	30±1 이상

측벽은 단면으로 되어 있음



이중관벽 구조의 형태

##### (2) 가축사체 매몰용 저장조 HDPE재질의 기준

구분	HDPE1
인장강도 (MPa)	20
인장파단변형 (%)	300
회분 (%)	0.3이하
아이조드충격 강도 (Mpa)	15
굴곡강도 (MPa)	15
밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	0.9
열안정성 (min)	20이상

#### 5. 가축가체 매몰용 저장조의 기타 규격

- 가스유출 배관은 가축저장조와 같은 재질로 한다
- 가축저장조의 절개된 출입구 부분은 피복을 하여 보호한다.

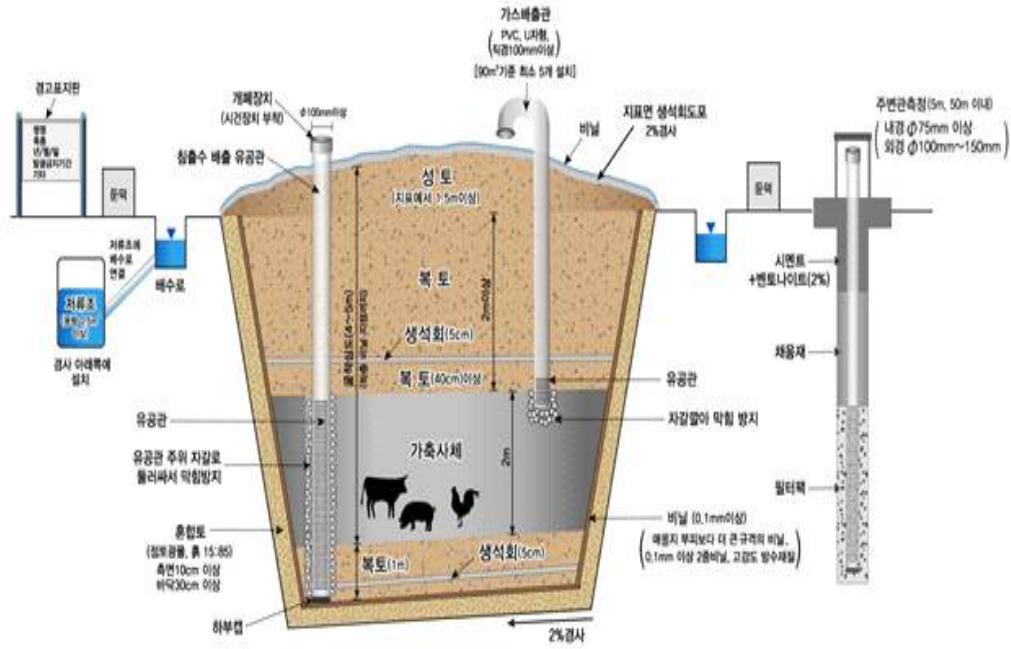
## 2-5. 침출수의 누출방지 : 기존 불투수재료의 특성을 파악하고 이의 개선방안

### 1) 기존 불투수재료의 특성제시

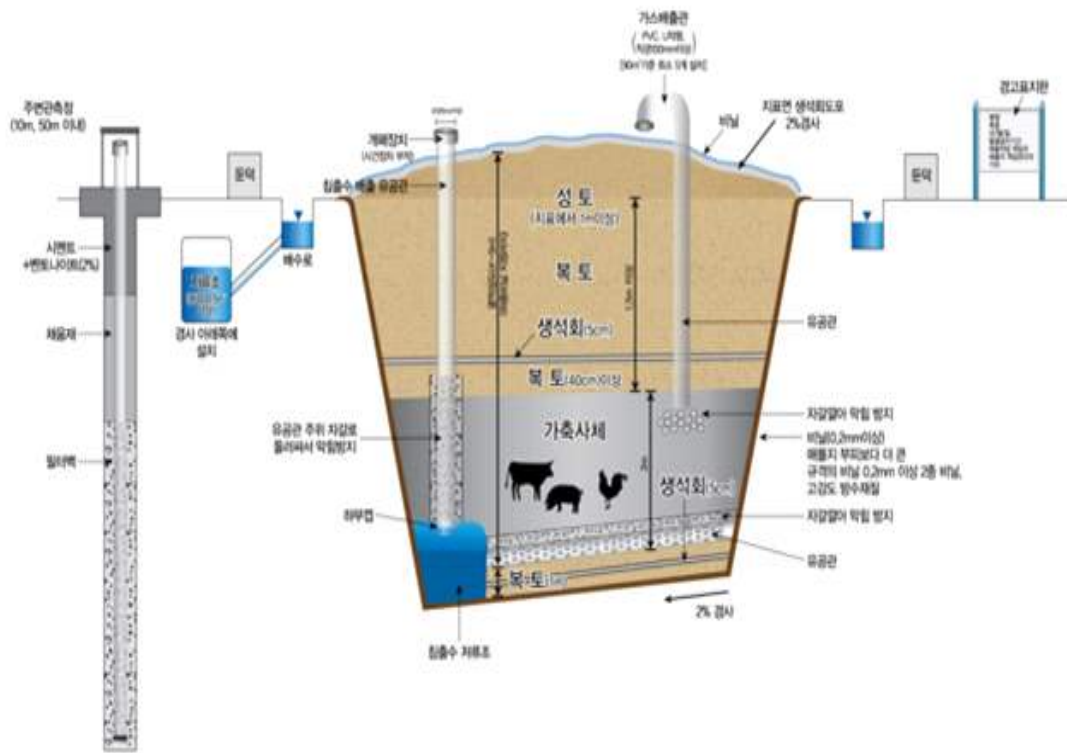
#### (1)매몰지 조성

- 국내 매몰지
  - ✓ 국내 가축매몰지 지침으로는 환경부의 가축매몰지 환경관리지침(2010)과 농림축산식품부의 구제역 긴급행동지침(2018)이 있음.
  - ✓ 농림축산식품부는 2004년 구제역 긴급행동지침을 발표한 이후 2010년, 2011년, 2012년, 2015년, 2018년에 걸쳐 개정되었으며 기존의 가축매몰지의 침출수 처리 및 방역관리 개선안을 제안함.
  - ✓ 구제역이 발생한 시점인 2010년에 대부분의 매몰지는 농림축산식품부의 구제역 긴급행동지침에 준하여 조성이 되었으며 환경부의 가축매몰지 환경관리지침에 준하여 관리됨
  - ✓ 각 지침서 상 매몰지에 대한 모식도는 그림 41과 그림 42와 같이 제시되어 있다. 지침의 모식도에 제시된 매몰지의 기준은 표 7에 비교, 분석함
  - ✓ 이 매뉴얼에는 구제역 및 조류독감으로 살처분 된 가축을 매몰 처리하기 위한 매몰 절차 및 방법이 자세하게 설명되어 있음.
  - ✓ 가축매몰지 환경관리지침에 의하면 구제역 매몰지는 매몰지 선정, 굴착, 차수재 설치, 하부 복토, 가축 매몰, 상부 복토, 지표 성토의 순서로 위생쓰레기매립장 시공 순서와 유사하게 설치되며 2차 환경오염을 방지하기 위한 차수재 설치, 침출수 배출 유공관, 가스배출관의 설치 등의 시설 요구 조건과 비탈진 곳을 피하고 하천과 관정, 도로 등에서 30 m 떨어진 곳에 매몰해야 하는 입지 조건 등을 제시하고 있음.





<그림 41> 매물지 설치 모식도(환경부, 2010)



<그림 42> 매물지 설치 모식도(농림축산식품부, 2018)

<표 7> 관리지침에 따른 매몰지 기준분석

구분	가축매몰지 환경관리지침 (환경부, 2010.11)	구제역 긴급행동지침 (농림축산식품부, 2018.12)
차수재	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 혼합토 + 비닐 (두께 0.1 mm 2겹 이상)</li> <li>• 고강도 방수재질</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 비닐(두께 0.2 mm 2겹이상) + 부직포 + 비닐커버</li> <li>• 고강도 방수재질(HDPE 등)</li> </ul>
침출수 처리	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수직유공관 (직경 100 mm 이상)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수직유공관 (직경 200 mm 이상)</li> <li>• 수평유공관 (직경 200 mm 이상)</li> <li>• 침출수 배출용 집수시설 (1 m<sup>3</sup> 내외)</li> </ul>
사체 매몰	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사체 매몰 2.0 m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사체 매몰 2.0 m</li> </ul>
하부 복토	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 차수재로부터 1.0 m</li> <li>• 생석회 5.0 cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 차수재로부터 1.0 m</li> <li>• 생석회 5.0 cm</li> </ul>
상부 복토	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사체위에 지표까지 2.0 m 이상</li> <li>• 생석회 5.0 cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사체위에 지표까지 1.5 m 이상</li> <li>• 생석회 5.0 cm</li> </ul>
성토	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지표면에서 1.5 m 이상</li> <li>• 성토 후 생석회도포 + 비닐</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지표면에서 1.0 m 이상</li> <li>• 성토 후 생석회 도포 + 비닐</li> </ul>
가스 배출관	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PC, U자형 (직경 100 mm 이상)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PC (직경 100 mm 이상)</li> </ul>
배수로	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 침출수 유출로 인한 오염방지</li> <li>• 저수조 용량 0.5 m<sup>3</sup>이상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 침출수 유출로 인한 오염방지</li> <li>• 저수조 용량 0.5 m<sup>3</sup>이상</li> </ul>
관측정	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 매몰지 경계외부에서 5 m 이내 깊이 10 m 내외</li> <li>• 침출수 유출 추정시 50 m 이내 추가 설치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 매몰지 경계외부에서 5 m 이내 깊이 10 m 내외</li> <li>• 침출수 유출 추정시 50 m 이내 추가 설치</li> </ul>

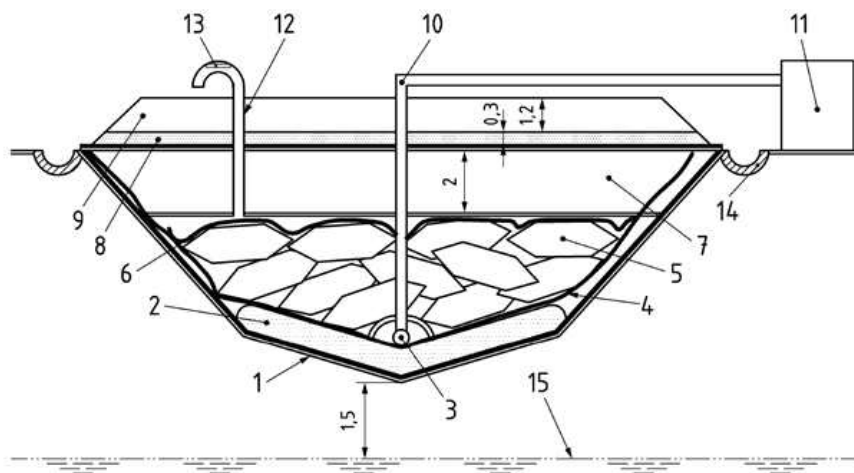
• 국외 매몰지

- ✓ 가축전염병 발생에 따른 매몰지 선정시 고려되어야할 환경인자는 하천과 같은 수원지, 도로, 주거지, 생산시설까지 거리와, 매몰지 조성시 가축사체로부터 지표까지의 복토두께, 관정으로부터 거리, 그리고 매몰지 바닥부에서 지하수위까지의 거리 등으로 분류할 수 있음.
- ✓ 미국, 캐나다, 영국, EU, 일본 등 총 40군데의 지역에 대한 국외의 법령 및 지침을 통계적으로 정리하면 표 8와 같음(주)다산컨설팅, 2015).

<표 8> 지역별 법령 및 지침에 따른 환경 인자에 대한 통계 수치

환경인자	고려한 지역 (건)	범위(m)	중간값(m)	최빈값(m)
하천, 수원지와의 거리	23	23~1,000	60	30
도로와의 거리	5	30 ~ 800	30	30
주거지와의 거리	11	30 ~ 800	90	90
생산시설과의 거리	1	30	30	30
복토두께	34	0.6 ~ 5.0	0.9	0.6
관정으로부터 거리	22	23 ~ 300	75	90
매몰지 바닥에서 지하수위까지 깊이	14	0.3 ~ 1.8	1.1	1.0

- ✓ 상기 표에 따르면 매몰지 복토두께가 34건으로 가장 많이 언급되어 있으며, 수원지와의 거리와 관정에서의 거리가 각각 23건과 22건으로 언급됨.
- ✓ 매몰지의 사전입지 선정시 고려된 인자는 제시된 값의 범위가 상당히 넓게 분포하고 있으며 이는 세계각국의 주변환경이 다양함에 따라서 환경과의 영향을 고려하여 적절한 이격거리를 둘 수 있는 지점을 매몰지로 선정하는 것이 바람직할 것으로 보임.
- ✓ 가축매몰지 조성에 대한 다양한 SOP를 검토하기 위해 ISO 규정에 따른 가축매몰지 모식도는 그림 43에 나타냄.
- ✓ ISO 규정에서 언급하는 매몰지의 각 부분에 대한 특성 및 고려인자는 다음과 같다.



<그림 43> ISO 규정에 따른 가축매몰지 모식도(ISO, 2009)

- ① 차수재 : 매몰지의 하부와 측벽부는 불투수 차수막, 즉 HDPE 시트 등으로 포설하여, 차수막을 여러겹 포설시에는 이음부에서 투수되지 않도록 하여야 한다.
- ② 하부복토층 : 매몰구덩이를 형성할 때, 하부바닥층에 이물질이 있으면, 점토나 세립토를 0.6 m 정도 포설하여야 한다. 특정경우에 소량의 벤토나이트나 시멘트를 포설한다. 또한, 뽕죽한 돌 등 차수막을 훼손시킬수 있는 물질의 경우 차수막을 보호할 수 있는 잡석을 150 mm 포설한다. 함수비가 높을 경우에는 소량의 생석회를 포설하여 건조화시킨다. 바닥부는 침출수 집수를 위하여 2%의 경사를 유지하도록 하며, 차수막 포설 후에는 복토층을 1 m 포설하고, 생석회를 3 cm 포설하여 지하수 오염을 방지하도록 한다.
- ③ 유공관 (침출수 집수관)
- ④ 하부생석회 : 생석회는 상황에 맞게 적용되어야 한다. 생석회는 습윤토양을 건조화시키고, 점토를 반응적으로 안정화시킨다. 수화작용에 의해 박테리아 박멸 효과가 있으며, 악취 저감 및 독성을 낮추며, pH를 조절하여 박테리아 박멸과 화학적 분해를 도모한다.
- ⑤ 가축사체 : 가축사체는 부패함에 따라 가스팽창으로 부피가 증가한다. 급격한 가스배출에 따른 부피 저감은 공극의 확대와 매몰지 지표면 부등침하를 야기한다. 또한, 가축의 똥 등 차수막을 훼손시킬 수 있는 요소는 최대한 제거하여야 한다. 가축사체는 지표면과 2 m 이상 깊게 묻어야 한다.
- ⑥ 상부생석회 : 가축사체 매몰후 생석회 2 cm를 포설하여, 침출수 및 악취 영향을 저감시킨다.
- ⑦ 상부복토 : 지표면과 동일하도록 2 m 정도 포설하도록 한다.
- ⑧ 벤토나이트 : 벤토나이트는 30 cm 포설한다.
- ⑨ 성토 : 강우에 의한 빗물 침투와, 야생동물의 훼손을 막고자 1.2 m 이상 복토한다.
- ⑩ 침출수 배출관
- ⑪ 침출수 처리조 : 침출수 역류를 방지하고 집수된 침출수를 소독한다.
- ⑫ 가스 배출관 : 가스배출관은 직경 100 mm 이상이며, U-형으로 빗물의 침투를 최소화한다. 약 90 m<sup>2</sup> 당 5 개의 배출관이 설치되어야한다.
- ⑬ UV-램프 : 가스배출관 끝단에 가스처리장치를 설치한다.
- ⑭ 배수로 : 성토 후에 방수포를 덮어 토사 흘림과 가스배출을 방지하고, 중앙부에 둔덕을 두어 배수로를 통해 우수가 흐르도록 한다.

- **가축 종류별 부피 및 중량**

- ✓ 매몰지 규모를 산정함에 있어서 가축의 부피와 중량은 중요한 인자이다. 그러나 가축의 종류와 성장 기간에 따라 많은 차이를 보여 정량적인 규모를 산출하기에는

한계가 있음.

- ✓ 이에 대해 가축종류별 사체의 부피를 표 9에 나타냈으며 가축의 생육상태에 따라 부피가 변화하게 됨.
- ✓ 소의 경우 다른 가축에 비하여 부피도 클 뿐만 아니라, 부피의 변화도 크게 변화함을 볼 수 있음.
- ✓ 돼지와 양은 동일한 수준의 부피를 보여주고 있으며, 가축무게의 경우 표 10에 나타낸 바와 같음.
- ✓ 제안된 문헌에 따르면 부피에 대한 지침이 없을 시에는 개략적으로 무게 300 kg 당 약 1 m<sup>3</sup>의 부피로 산정할 것을 제안하였음.(서울시립대학교 산학협력단, 2008)
- ✓ 구제역 긴급행동지침에 따르면 높이 5 m, 폭 5 m, 길이 20 m 인 500 m<sup>3</sup> 규모의 적정 매몰 두수는 소 100마리, 돼지 550마리로 산정하고 있음.
- ✓ 영국의 경우 소 20마리, 혹은 돼지 60마리, 양 60마리 매립시 높이 4 m, 폭 3 m, 길이 6 m 인 722 m<sup>3</sup>을 권장함.(농림축산식품부, 2018)

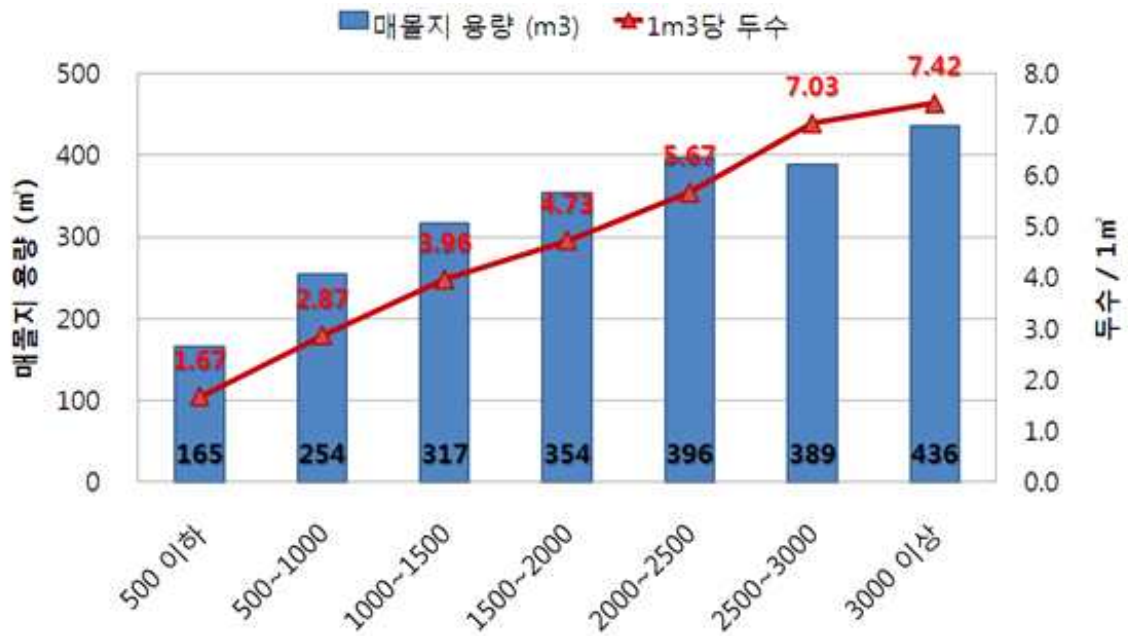
<표 9> 가축종별 부피(서울시립대학교 산학협력단, 2008)

종류	소	돼지	닭	양
가축 1마리당 부피 (m <sup>3</sup> )	1.3 ~ 2.3	0.26 ~ 0.46	0.001~0.006	0.26 ~ 0.46

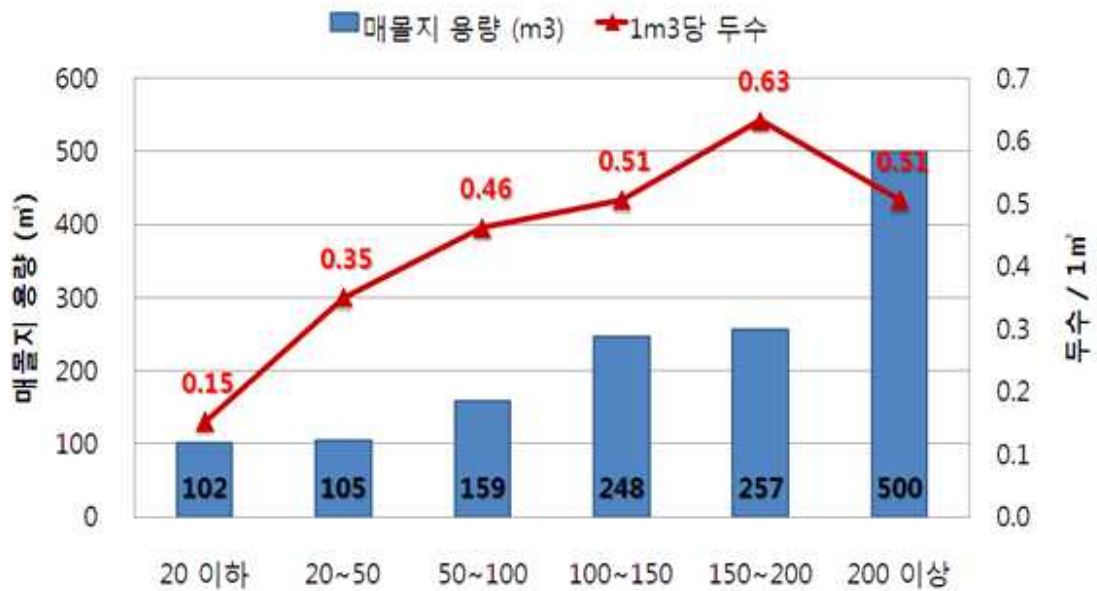
<표 10> 가축종류별 평균 무게(ISO, 2011)

종류	육우			젖소			돼지			조류		양
	암컷	수컷	새끼	암컷	수컷	새끼	암컷	수컷	새끼	닭	거위	
중량(kg)	550	450	135	600	450	135	150	100	16	1.8	8	50

- ✓ 상기에서 언급된 문헌조사에 따른 가축종류에 따른 부피와 무게는 매몰지 규모 산정에 있어서 지표로서 적용할 수 있으나, 실제 국내에 매몰된 가축 사육두수에 따른 매몰지 용량 변화를 분석하여 적용성을 판단함
- ✓ 00시의 자료를 기초로 매몰두수에 따른 매몰지 용량을 분석하였으며, 그림 44와 그림 45에 나타냄.
- ✓ 매몰두수가 증가할수록 매몰지 용량도 증가하나 증가율이 낮아지는 경향을 보이고 있음.
- ✓ 돼지의 경우 500두수 이하의 매몰지에서는 1 m<sup>3</sup>당 1.67두가 매몰되었으며, 2,500두 이상의 매몰지에서는 1 m<sup>3</sup>당 7.03마리 이상이 매몰됨.
- ✓ 소는 20두이하의 매몰지에서는 1 m<sup>3</sup>당 0.15두가 매몰되었으며, 100두이상의 매몰지에서는 1 m<sup>3</sup>당 0.5마리 이상이 매몰됨.
- ✓ 이는 사육두수가 적은 소규모농가에서는 새끼에 비하여 성체의 비율이 높은 반면, 대규모 축산단지의 경우는 성체보다 새끼의 비율이 높아져 단위체적당 매몰두수가 증가함을 볼 수 있음.
- ✓ 매몰지 규모 산정시 축산농가의 가축 사육두수 및 연령 비율에 따른 적정규모가 산정되어야 함.



<그림 44> 돼지 매물두수에 따른 매물지 용량 변화



<그림 45> 젖소 사육두수에 따른 매물지 용량 변화

• 매몰지 문제점

- ✓ 구제역은 빠른 감염속도로 인해 전국적으로 확산하게 되는데 시간, 인력, 장비 등의 부족할 경우 그림 46과 같이 대량의 매몰 및 생매장 등으로 매몰지가 조성되거나 관리가 제대로 이루어지지 않아 2차 환경피해가 발생할 수 있음.(김미영 외, 2013)
- ✓ 대표적으로 미분해 사육, 침출수 유출, 악취 발생문제가 있으며 발생원인으로는 다음 표 11와 같음.



<그림 46> 가축매몰지 문제점

<표 11> 가축매몰지 문제점

구분	발생원인
차수재(비닐)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 비닐 접합 부위로 침출수 유출</li> <li>• 생석회 발열로 인한 비닐 훼손</li> <li>• 생매장으로 인한 비닐 파손</li> <li>• 대규모 매몰지 조성시 사체처리로 인한 비닐 훼손</li> </ul>
관리	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 경사면에 조성된 매몰지의 침식 및 붕괴</li> <li>• 매몰지 지반의 용기 및 침하</li> <li>• 매몰지 배수 처리 미흡</li> <li>• 단기간 매몰지 조성시 매뉴얼 미준수</li> </ul>
악취	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 침출수 관정 및 가스 배출구를 통한 악취 유출</li> <li>• 침출수 유출로 인한 악취발생</li> </ul>



• 차수재의 종류

- ✓ 차수시설은 표 12과 같이 일반적으로 수평차수시설과 수직차수시설로 구분하며, 재료의 종류에 따라 점토차수재, 합성 차수막, 토목섬유-점토 차수재, 혼합 차수재 등으로 구분함(이남훈 등, 2005).

<표 12> 차수시설의 분류(이남훈 등, 2005)

분류	
수평 차수재	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 점토 차수재(clay liner)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 자연점토 차수재(natural clay liner)</li> <li>- 다짐점토 차수재(compactd clay liner)</li> </ul> </li> <li>○ 합성 차수막(Geomembrane)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 열가소성(thermoplastics): PVC, EIA</li> <li>- 결정질 열가소성(crystalline thermoplastics): HDPE, MDPE, LDPE</li> <li>- 열가소성 탄성중합체(thermoplastics elastomers): CPE, CSPE</li> <li>- 탄성중합체(elastomers): EPDM, IIR</li> </ul> </li> <li>○ 토목섬유-점토 차수재(geosynthetic clay liner)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 합성섬유(geotextile)와 벤토나이트 결합재: bento-mat, claymax, geobent</li> <li>- 합성차수막(geomembrane)과 벤토나이트 결합재: paraseal, gundseal</li> </ul> </li> <li>○ 혼합 차수재               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 흙-벤토나이트</li> <li>- 흙-시멘트</li> <li>- 흙-모래 아스팔트</li> <li>- 플라이애쉬 혼합재</li> <li>- 아스팔트 콘크리트</li> <li>- 콘크리트</li> </ul> </li> </ul>
연직 차수재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 시트파일(sheet pile)</li> <li>- 슬러리월(slurry wall)</li> <li>- 토양혼합월(soil mixed wall)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 그라우트커튼</li> </ul> </li> <li>- 합성수지 차수막(geomembrane)</li> </ul>

- 수평채수재

- 점토 차수재

- ✓ 점토 차수재는 소정의 차수성과 다짐도를 가진 자연점토 차수재와 소정의 차수성과 다짐도를 가지지 못하여 인위적으로 다짐을 가한 다짐점토 차수재가 있음.
  - ✓ 자연점토 차수재는 매립장 기초지반에 자연적으로 형성된 원점토 지반으로서 내륙 지역의 양질의 점토 또는 해안지역의 해성점토를 예로 들 수 있음.
  - ✓ 다짐점토 차수재는 매립장 기초 지반의 현장토가 차수재로서 적합하지 않은 경우에 현장 내 또는 현장 외부에서 점토를 채취하여 다짐한 것임.

물리적 특성

- ✓ 흙의 성질은 함수량에 따라 크게 좌우된다. 특히, 실트분과 점토분을 다량으로 포함하는 세립토에서는 함수비의 대소에 따른 흙의 연경도에 의해 성질이 크게 좌우됨.
- ✓ 따라서 폐기물매립장의 차수재로 사용되는 점토는 연경도가 어느 정도 되는지 검토되어야 함.

화학적 특성

- ✓ 대부분의 점토는 규소, 알루미늄, 마그네슘 및 철 등의 성분으로 구성되어 있으며 얇은 판모양의 결정구조로 사면체구조와 팔면체구조 두 종류의 기본 단위체로 구성되어 있음.
- ✓ 점토광물은 단위 셀의 높이에 따라 kaolinite, smectite, illite, chlorite 등의 군으로 분류됨.
- ✓ 흙은 기본적으로 고유의 흡착성 및 양이온 교환능력을 가지고 있기 때문에 점토차수재의 경우 침출수 내의 오염물질을 자체적으로 정화 시킬 수 있는 특성을 가지고 있음.

재료기준

- ✓ 폐기물관리법(환경부, 2018)에서 점토 차수층을 사용하는 경우 다음의 사항을 요구하고 있음.

투수계수:  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하

세립토 함량 : 39~50%

자갈함량 : 20~25%

소성지수 : 7~10%

최대입경 : 25~50 mm

- 토목섬유-점토 차수재 (geosynthetic clay liners, GCL)

- ✓ 일반적으로 GCL은 벤토나이트를 니들링(needling), 스티칭(stitching), 화학 접착제(chemical adhesive) 등으로 지오텍스타일 또는 합성수지 차수막 사이에 역학적으로

지지될 수 있도록 만든 제품을 말함.

- ✓ CL의 종류는 지오텍스타일/합성수지 차수막과 벤토나이트의 결합방식에 따라 보강 GCL과 비보강 GCL로 구분됨.
- ✓ 벤토나이트는 GCL의 투수특성에 중요한 영향을 미치며 토목섬유는 구조적 특성에 영향을 미침.

#### - 혼합 차수재

- ✓ 혼합 차수재는 차수재로서 사용되려는 주재료가 차수재질기준을 만족하지 못하고 양이 충분하지 못한 경우에 사용됨.
- ✓ 혼합 차수재의 종류는 사용하는 재료에 따라 흙-벤토나이트, 흙-시멘트, 일반시멘트 콘크리트, 황산염 콘크리트, 플라이애쉬-시멘트/석회/벤토나이트 등으로 분류됨.

#### 흙·벤토나이트

- ✓ 흙-벤토나이트 혼합 차수재는 채취한 자연토의 투수계수가 규정치보다 클 경우에 자연토에 벤토나이트를 혼합한 것임.
- ✓ 여기서 벤토나이트가 투수저감 효과가 크기 때문에 벤토나이트를 첨가함.
- ✓ 벤토나이트의 혼합비는 채취된 자연토의 토질특성에 따라 차수조건에 만족하는 첨가량을 산정해야함(Sharma 외, 1988).
- ✓ 벤토나이트 함량이 증가할수록 일축압축강도 및 인장강도는 증가하며 전단강도는 영향을 거의 받지 않음(김강일 외, 2010).
- ✓ 흙·벤토나이트 층을 완성한 후에는 차수층 위에 차수재를 보호하기 위한 토층을 30~60 cm 정도 설치함.

#### 흙·시멘트

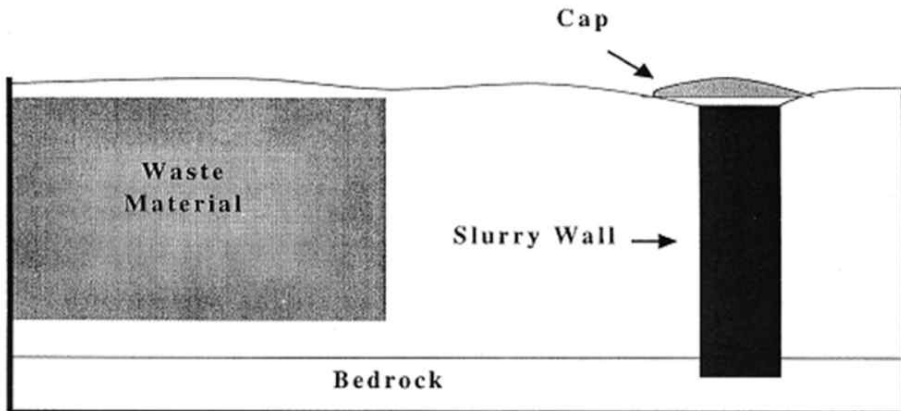
- ✓ 흙·시멘트 차수재는 자연토에 시멘트를 혼합한 재료로 자연토보다 투수계수가 작고 강도가 크며 침식에 대한 저항성이 큰 시멘트를 사용함.
- ✓ 시멘트의 첨가량은 흙의 입도분포에 의해 결정되며 일반적으로 시멘트의 첨가량이 증가할수록 재령기간이 길수록 압축강도는 증가함(김수문 외, 2000).
- ✓ 흙시멘트 차수재는 양생이나 운영중에 균열이나 건조수축이 발생되기 쉽고 10-7 cm/sec이하의 투수계수를 얻기가 어려운점이 있음.

#### • 수직차수재

##### - Slurry wall

- ✓ Slurry wall은 침출수 유출 및 지하수의 침투를 방지하기 위해 매립장 주변에 시공하는 트랜치에 벤토나이트 슬러리를 공급하면서 원하는 깊이(보통 불투수층)까지 수직으로 굴착한 후 뒷채움재를 충전하여 벽체를 시공하는 방법으로 30 m까지의 깊이에 0.6~1.2 m의 두께로 시공함.
- ✓ 이 방법은 일반적으로 capping과 연계하여 부지가 큰 경우나 긴급히 오염물의 차

단이 필요한 경우에 적용됨.



<그림 47> Slurry wall의 개요

**- Sheet pile**

- ✓ Sheet pile은 강널말뚝기술이라고 하며 강철로 된 철판형태의 pile을 연결하여 불투수층까지 박아 차수기능을 갖게 하는 기술임.
- ✓ Sheet pile은 시공시 땅자갈 섞인 지반에서는 항타작업이 어려운 점이 있으며 시공이 쉽고 단기간내에 설치가 가능하나 조기 불투성이 미흡하고 다소 고가임.
- ✓ 국내에서는 난지도 매립장 정비공사에 적용된 바 있음.

**2) 현장조건에서 사용할 수 있는 토목재료(벤토나이트)의 포설방법 제시**

**(1) 폐기물 매립공법**

- ✓ 가축매몰지는 소규모로 조성된 비위생 유기성 폐기물 매립지로 간주할 수 있음.
- ✓ 기존에 정립되어 있는 비위생 매립지 정화공법을 고찰하여 이를 매몰지 정화방안에 적용하고자 함.

**• 매립공법의 결정 시 고려사항**

- ✓ 매립공법을 개발하는데 있어서 가장 중요한 것은 매립지가 수행하여야 할 기능 중에서 어떠한 기능을 강조할 것인가에 대한 분명한 목표를 설정하여야 함.
- ✓ 폐기물매립지가 갖추어야 할 기능은 다음과 같음.

- 적절한 장소에 충분한 처분용량을 확보하여 자연환원처리가 이루어질 수 있는 보관·처리의 기능을 보유
- 유해물질 등이 반입될 경우를 대비하여 환경오염에 대한 차단벽으로서의 역할을 담당할 수 있는 환경보전의 기능 필요
- 매립폐기물과 매립부지는 잠재자원이므로 자원회수의 기능 충족
- 폐기물매립지의 확보가 곤란한 상황에서는 지역주민들에게 혜택을 줄 수 있는 지역환원의

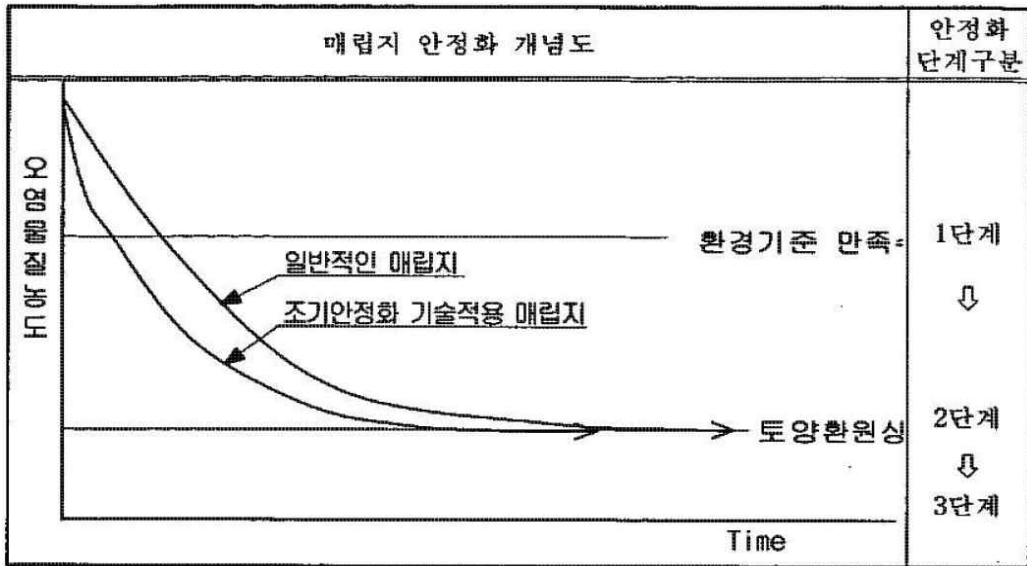


<그림 48> 매립지의 기능

## (2) 폐기물 매립지 안정화 공법

- ✓ 폐기물 매립지의 안정화란 매립된 폐기물이 장기간에 걸쳐 물리·화학적, 생물학적 분해 작용을 받아 유기물은 분해되어 가스화되거나 침출수로 배출되고, 무기물과 중금속류는 용탈되어 최종적으로 침출수로 배출되면서 매립지반이 침하되고 최종적으로 토양과 같은 상태로 환원되는 것을 말함.
- ✓ 매립 폐기물의 안정화 단계를 보면 그림 49 및 아래와 같음.

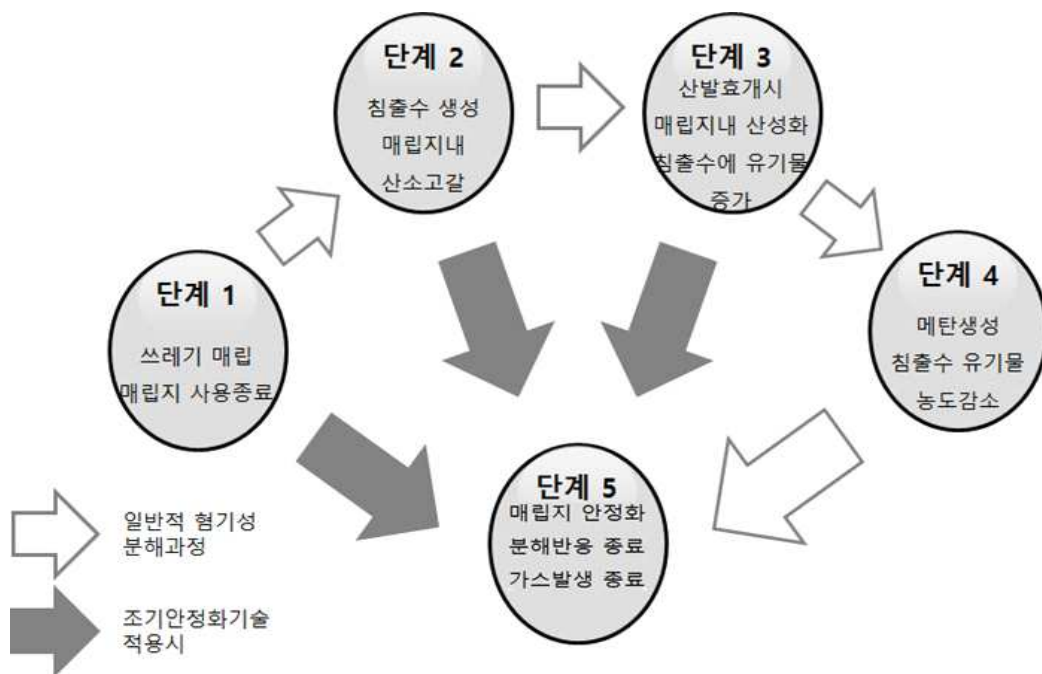
- 1단계 : 침출수나 매립가스를 정화하는 등의 매립지 유지관리를 하지 않아도 환경에 미치는 영향을 무시할 수 있는 단계
- 2단계 : 땅 속에 머물러 있는 한 외부에 영향을 미치는 변화를 일으키지 않는 상태
- 3단계 : 폐기물을 굴착해 대기나 강우에 노출시켜도 환경에 영향을 미칠 수 있는 변화가 일어나지 않는 토양환원 상태



<그림 49> 매립지 안정화 단계 (KONETIC, 2006)

• 조기안정화

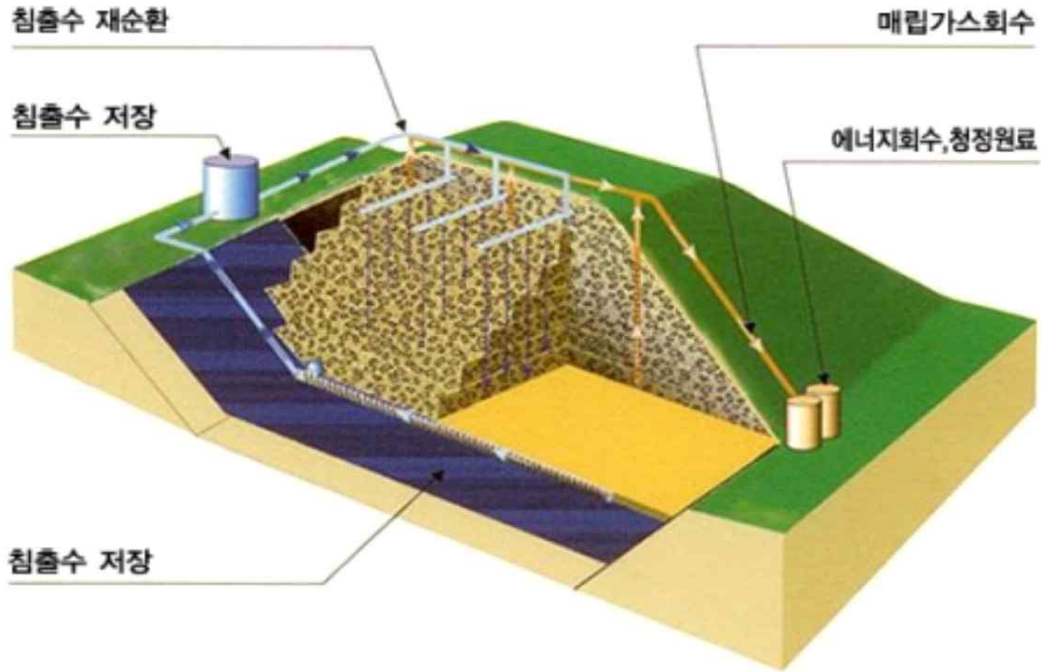
- ✓ 기존의 사용종료된 불량매립지 등의 정비방법은 굴착 후 선별하는 이적처리 방법과 차수막, 차수벽의 설치, 가스배제 등으로 오염확산을 방지하는 현지안정화 방법이 대부분이며, 이러한 방법들은 환경적으로 오염부하 저감효과가 적거나 장기적으로 주변 환경의 오염원으로 존재 할 가능성이 큼.
- ✓ 따라서 불량매립지는 매립지 내에서 장기간에 걸쳐 여러 단계로 진행되는 안정화 기간을 단축시켜 매립지를 조기에 안정화함으로써 매립지를 주변 환경오염에 영향을 주지않는 상태로 전환시키는 조기안정화 기술이 필요함.



<그림 50> 조기안정화 기술 적용 개념도 (KONETIC, 2006)

- **침출수 재순환**

- ✓ 침출수 재순환은 그림 51과 같이 매립지에서 발생한 침출수를 폐기물 매립층의 표면 또는 매립층의 내부로 반송하여 폐기물 매립층을 통과시킴으로써 발생하는 침출수량의 삭감 및 정화하여 매립지의 안정화 촉진을 도모하는 방법으로 주로 미국, 일본 및 독일 등에서 연구가 활발히 추진되고 있음.

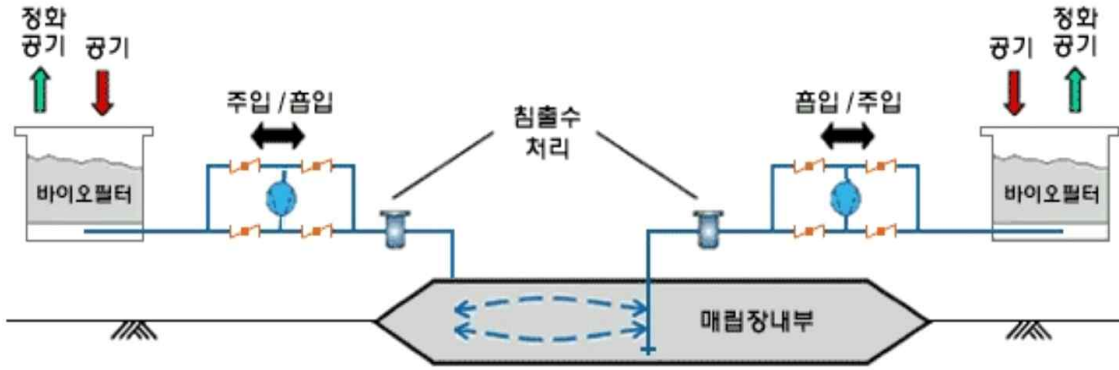


<그림 51> 침출수 재순환시설 모형도 (㈜케이백코리아)

- ✓ 침출수 재순환이 일어나는 경우 혐기성 분해를 촉진시켜 침출수를 정화하고 매립지 안정화 및 조기 침화에 의한 오염물질의 감소를 기대할 수 있음.
- ✓ 단점으로 혐기성 분해로 인한 악취, 다른 공법에 비해 분해가 느리며 재순환을 위해 원활한 투수성이 확보되어야 함.

- **악취안정화 공법**

- ✓ 불량, 비위생 매립장 정비·복원공사시 매립장 가스의 안정화 및 매립장 내부를 혐기성 상태에서 호기성 상태로 조기 안정화시키는 공법임.
- ✓ 공법원리는 매립장 내부에 생긴 악취가스와 유해가스를 뽑아내어 Biofilter로 제거하고 또한 Biofilter 내의 호기성 미생물을 동반하고 있는 산소가 풍부하고 따뜻한 공기를 매립장 내부로 주입하여 매립장을 혐기성 상태에서 호기성 상태로 바꾸어 안정화 시킴.

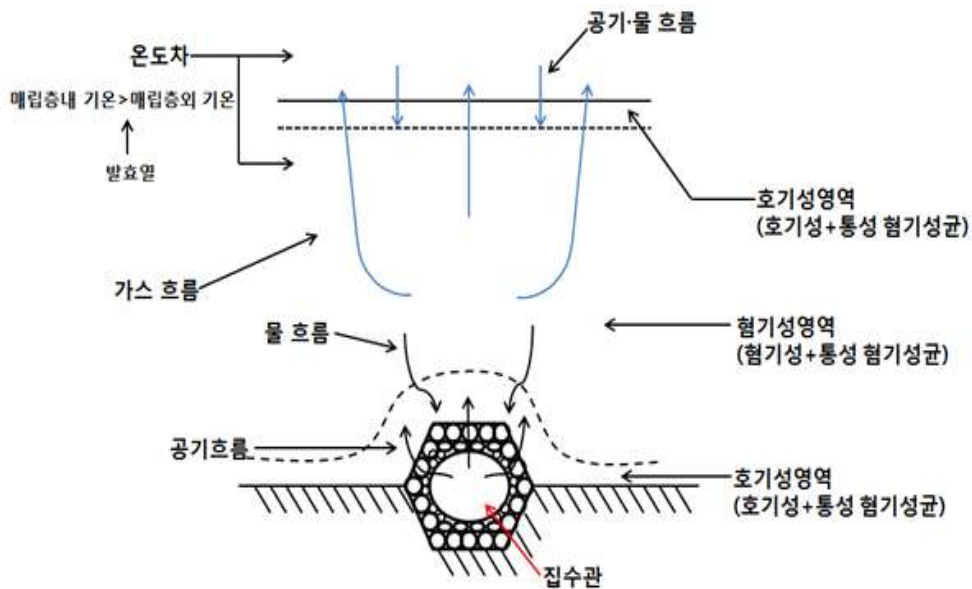


<그림 52> 연속공기주입법 공정도 (주아이유티)

- ✓ 일반적으로 매립지 내부에 혐기성 분해로 인해 생기는 매립가스로 인해 대기오염, 악취, 폭발 등의 위험이 있는 경우 악취안정화 공법을 사용함.
- ✓ 다른 공법에 비해 비교적 고비용이 소모되는 단점이 있음.

• **준호기성 매립공법**

- ✓ 준호기성 매립공법은 그림 53에서 보는 바와 같이 매립지 저부 집수관을 통해 공기가 밀도차에 의해 자연적으로 매립층 내에 공급되어 집수관 근방에 호기성 영역을 형성하여 호기성분해를 촉진시키는 공법임.
- ✓ 이 공법은 경제성도 높고 유지관리도 용이한 것으로 평가되어 일본에서 약 50%의 매립지에서 사용하고 있음.
- ✓ 강제로 공기를 주입하는 공기주입법과 다르게 밀도차에 의한 공기전달 형식이므로 복토 및 폐기물층의 통기계수를 고려해야하며 평지 매립지에 적합함.



<그림 53> 준호기성 매립시스템(삼성물산㈜ 건설기술연구소, 1996)



- **현지안정화**

- ✓ 현지안정화 기술은 매립지에서 발생하는 침출수 및 발생가스가 주변의 토양 및 지하수 등으로 유출되는 것을 방지하기 위해 차수시설을 설치함.
- ✓ 주로 대규모 매립지나 정비를 서두르지 않아도 되는 매립지의 경우에 적용함.

### 3) SOP에 언급되어 있는 생석회 포설방법에 대한 검토

#### (1) 라이시미터 실험

- ✓ 차수재의 차수기능 개선 및 시공성 개선을 위하여 이천시 소재 연구부지에 현장실증을 위한 모형 매몰지를 4 m × 4 m × 0.5 m 규모로 라이시미터를 조성하여 파일럿 규모 실험을 실시함.
- ✓ 라이시미터 1과 라이시미터 2는 각각 생석회 5 cm의 단독포설과 화강풍화토, 생석회 1:1 무게비로 혼합한 혼합토 10 cm를 포설함.
- ✓ 그림 4.9는 라이시미터 1, 2를 조성하는 단계를 보이고 있음.
- ✓ 차수를 위해 방수페인트를 라이시미터의 벽면 및 바닥에 도포하였으며 유출을 확인하기 위해 PVC(25 mm)관으로 유공관을 제작해 설치, 이후 생석회 포설 및 다짐을 실시하여 라이시미터를 조성함.



(a) Lysimeter 1, 2 제작



(b) 방수페인트 도포



(c) 바닥층 조성



(d) 유공관 설치



(e) 토양층 포설



(f) 토양층 다짐

<그림 54>. 라이시미터 조성과정



(g) Lysimeter 1 생석회 포설



(h) Lysimeter 1 생석회 포설완료



(i) Lysimeter 2 생석회+토양 포설



(j) Lysimeter 1,2 차수층조성



(k) Lysimeter 1,2 성토



(l) Lysimeter 1,2 다짐

<그림 54> 라이시미터 조성과정(계속)

- ✓ 라이시미터에 고르게 물을 살포하였으며 이때 살포되는 수량을 측정하였다. 초기 10분이상 물을 살포한 후 매몰지내부가 포화되도록 대기하였으며 유출이 발생할 때까지 반복적으로 실시함.
- ✓ 생석회(5 cm)가 포설된 L1과 생석회와 현장토가 1:1로 혼합되어 10 cm 두께로 포설된 L2에 동일한 물을 상부에 고르게 뿌린 경우 유출량은 다음 표 4.8와 같음.
- ✓ L1은 유출이 발생하지 않았고 L2는 유출이 발생하였는데 가해진 물의 약 1.5%가 유출됨.

<표 13> 라이시미터 실험결과

경과시간	유입량	Lysimeter 1 유출량 (liter)	Lysimeter 2 유출량 (liter)
1	220 L	-	-
2	220 L	-	8.4 L
3	110 L	-	1.8 L
4	110 L	-	1.32 L
5	110 L	-	0.18 L
6	110 L	-	1.38 L
총량	880 L	-	13.08 L

- ✓ 이 현장규모 실험에서 특기할 만한 사항은 생석회 5 cm를 포설한 경우가 생석회와 화강풍화토를 1:1 비율로 혼합하여 10 cm로 포설한 경우보다 차수능이 우수하다는 것임.
- ✓ 생석회를 혼합하면 투수계수가 감소하지만 원 토양이 사질토인 경우 50% 정도의 혼합비로는 여전히 투수성이 높기 때문에 다른 부가재 예를 들면 벤토나이트 등을 혼합할 필요가 있음.
- ✓ 본 실험의 경우 생석회만을 포설한 경우 차수능을 기대할 수 있으나, 혼합토의 경우 침출되는 것을 보였음.
- ✓ 따라서 사용된 석회의 일부분만이 수화반응을 겪게 될 가능성이 높다고 할 수 있으며 이렇게 층 형태로 석회를 사용하게 되면 생석회의 수화반응으로 인해 lime cast가 형성되어 배수가 되지 않는 층이 형성될 가능성이 있다고 판단됨.
- ✓ 실험이 종료된 후 상부토양 일부를 제거하여 생석회층을 육안관찰하였고, L1의 경우 생석회층이 물과 반응하여 수화반응으로 인해 그림 55와 같이 굳어 배수가 되지 않는 층이 형성될 가능성이 있다고 판단됨.



(a)



(b)

<그림 55> 라이시미터 실험 종료후 관찰결과

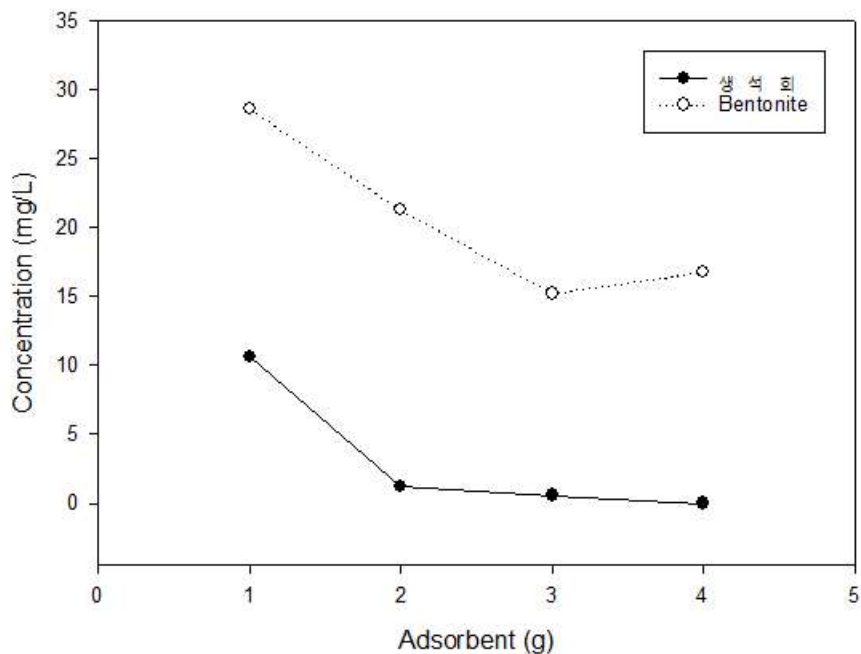
(a) 생석회단독포설, (b) 생석회-토양 복합포설

#### 4) 화강풍화토-생석회-벤토나이트 및 불투수재료의 포설방법 제시

- (1) 회분석 흡착실험
  - ✓ 무수염화암모늄 0.3819 g을 1 L에 녹여 조제한 초기농도 100 mg/L의 시료용액 100 mL에 생석회와 벤토나이트 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 g를 첨가 한 후 인큐베이터 내  $20 \pm 5$  °C의 환경을 조성하여 12시간동안 진탕함.
  - ✓ 진탕 이후 원심분리기를 이용해 2000 rpm의 속도로 30분간 분리하여 상등액을 취해 농도를 분석함.
  - ✓ 분석방법은 수질오염공정시험기준의 암모니아성 질소 - 자외선/가시선 분광법에 준하여 실험하였으며, 실험결과는 다음과 같음.

<표 14> 등온흡착 실험결과

첨가량 (g)	생석회		벤토나이트	
	농도 (mg/L)	저감량 (mg/L)	농도 (mg/L)	저감량 (mg/L)
1	10.59	89.41	28.6	71.4
2	1.18	98.82	21.27	78.73
3	0.57	99.43	15.22	84.78
4	0	100	16.77	83.23

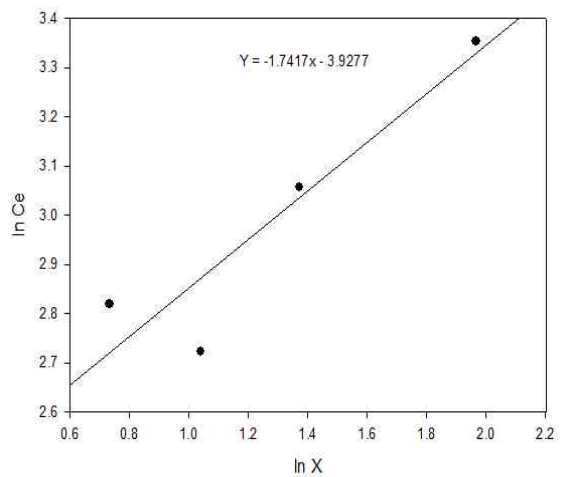
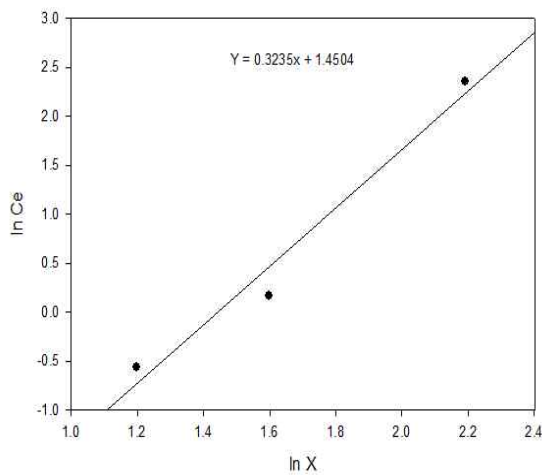


<그림 56> 등온흡착 실험결과

- ✓ 실험 결과 생석회의 경우 매우 높은 저감효율을 나타내었음.
- ✓ 벤토나이트는 생석회와 비교하면 적은 효율로 나타났지만, 벤토나이트의 저감량 역시 높은 효율을 나타내었음.
- ✓ 현재 구제역긴급행동지침(SOP)에 따르면 생석회는 살균, 벤토나이트는 차수의 성능을 위해 사용되고 있지만, 침출수 내 가장 높은 농도와 동시에 악취의 원인인 암모니아성 질소에 대해서도 좋은 흡착효율을 보여주었음.

<표 15> Freundlich adsorption isotherm 자료

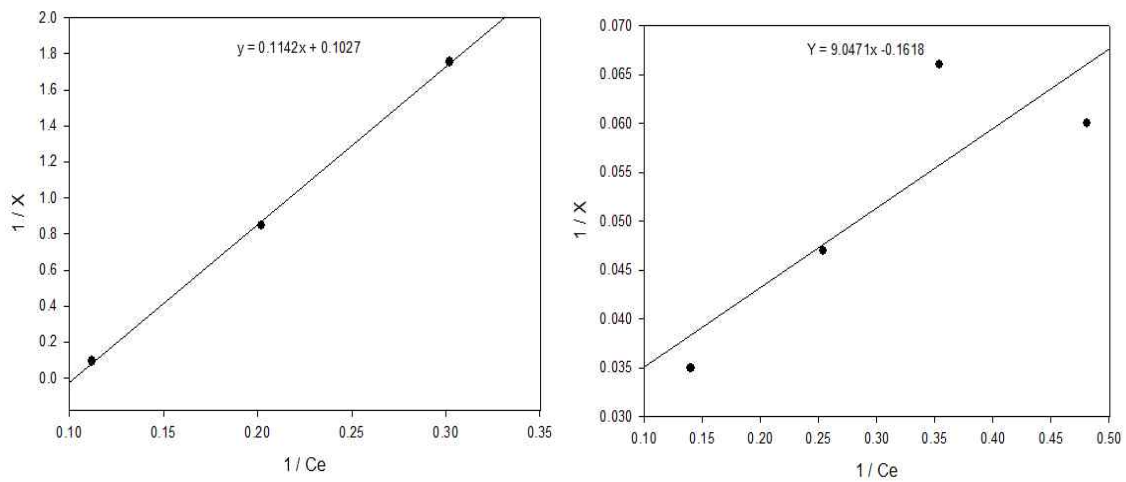
생석회 (g)	초기농도 (mg/L)	농도 값 (mg/L)	ln X	ln Ce	벤토나이트 (g)	초기농도 (mg/L)	농도 값 (mg/L)	ln X	ln Ce
1	100	10.59	2.191	2.359	1	100	28.6	1.966	3.353
2	100	1.18	1.598	0.166	2	100	21.27	1.370	3.057
3	100	0.57	1.198	-0.56	3	100	15.22	1.039	2.723
4	100	0	0.916	N/D	4	100	16.77	0.733	2.820



<그림 57> Freundlich adsorption isotherm 그래프

<표 16> Langmuir adsorption isotherm 자료

생석회 (g)	초기농도 (mg/L)	농도 값 (mg/L)	1 / X	1 / Ce	벤토 나이트 (g)	초기농도 (mg/L)	농도 값 (mg/L)	1 / X	1 / Ce
1	100	10.59	0.112	0.094	1	100	28.6	0.14	0.035
2	100	1.18	0.202	0.847	2	100	21.27	0.254	0.047
3	100	0.57	0.302	1.754	3	100	15.22	0.354	0.066
4	100	0	0.4	N/D	4	100	16.77	0.481	0.060

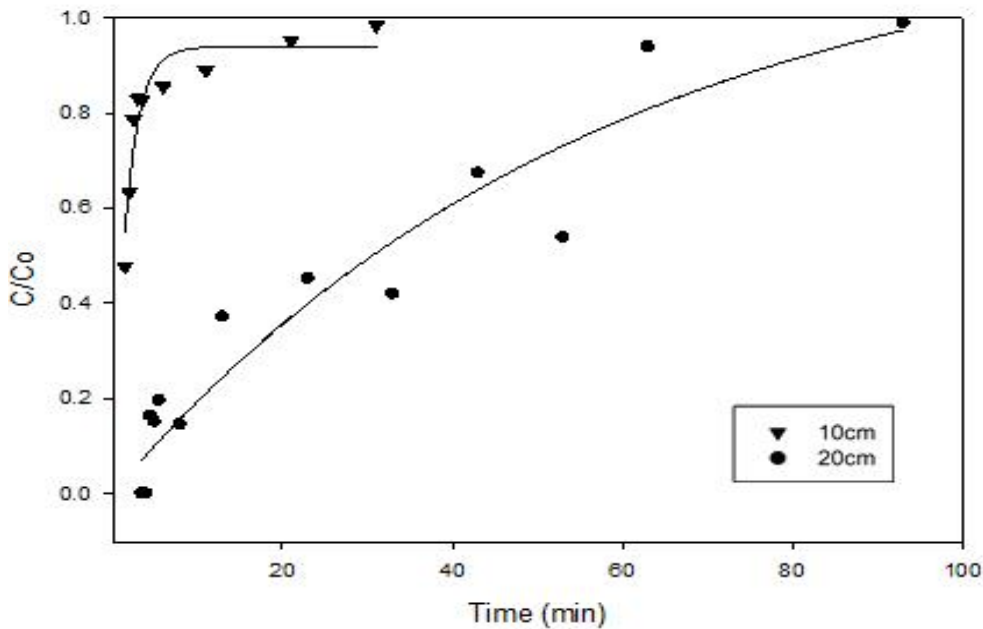


<그림 58> Langmuir adsorption isotherm 그래프

- ✓ Langmuir 식은 단분자층 흡착을 기반으로 유도된 공식이며, Freundlich 식은 Langmuir 흡착등온식에 흡착열이 표면 덮임의 정도에 따라 지수적으로 감소한다는 내용을 도입하여 유도된 경험식임.
- ✓ 등온흡착실험을 통해 얻은 데이터들을 Freundlich와 Langmuir의 등온흡착식에 적용한 값은 표 15, 표 16와 그림 51, 그림 52에 나타내었으며 다음은 그래프를 통해 얻은 등온흡착식임.
- ✓ 선행연구에 따르면 Freundlich 그래프의 기울기가 0.5 이하일 때 활성탄에 의한 흡착효과가 좋다고 보고되었는데, 본 연구에서 생석회의 기울기는 0.114, 벤토나이트의 기울기는 1.742 로 나타남.
- ✓ 생석회의 경우 벤토나이트에 비교적 효율적인 흡착이 이뤄질 것으로 예측됨(유용호, 2005).

## (2) 칼럼 흡착실험

- ✓ 본 실험은 고정층의 길이 변화에 따라 흡착효율을 보고자 생석회 10%를 혼합한 혼합토를 칼럼에 10 cm, 20 cm씩 채워 고정층 실험을 행하여 얻은 실험치는 그림 59과 같이 나타남.
- ✓ 그림을 보면 격변 농도비가  $C/C_0 = 1$ 일 때의 시간은 각각 30 min, 150 min 순으로 증가하며 층높이가 길어질수록 격변곡선이 완만하게 나타나는데 이것은 층 높이가 증가하면서 칼럼 내 유체의 체류시간이 길어져 흡착물질이 충분히 흡착되어 유출되는 것으로 사료됨.



<그림 59> 층 높이별  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도비

## 5) 투수실험(정수두, 변수두) 및 다짐시험 실시

### (1) 혼합차수재 투수실험

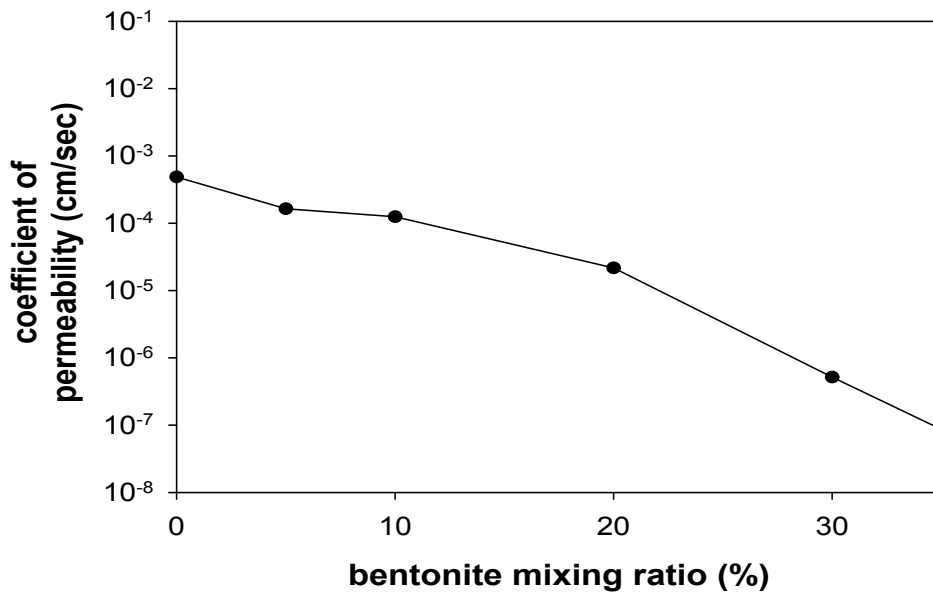
- ✓ SP와 SM으로 분류된 흙 모두 벤토나이트를 10%까지 혼합하였을 때까지 매몰지 기준을 만족하지 못함.
- ✓ 실험결과 연구토양(SP)의 경우 벤토나이트를 35%를 혼합하였을 경우 매몰지 기준에 만족하는 투수계수를 얻을 수 있음.
- ✓ 문헌(김수문 등, 2000)에 의하면 SM으로 분류된 흙은 벤토나이트를 15% 혼합하였을 때 매몰지 기준에 만족하는 투수계수를 얻을 수 있음.



<표 17> 연구토양의 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수

벤토나이트 혼합비	투수계수 (cm/sec)
0 %	$4.87 \times 10^{-4}$
5 %	$1.65 \times 10^{-4}$
10 %	$1.26 \times 10^{-4}$
20 %	$2.17 \times 10^{-5}$
30 %	$5.18 \times 10^{-7}$
35 %	$8.66 \times 10^{-8}$

- ✓ 화강풍화토와 벤토나이트를 섞은 혼합토의 투수계수 실험결과는 그림 54과 같음.



<그림 60> 벤토나이트 혼합비에 따른 화강풍화토의 투수계수

- ✓ 그림 54에서와 같이 화강풍화토에 벤토나이트를 혼합함에 따라 투수계수가 감소하는데 이는 화강풍화토의 공극을 벤토나이트가 매우게 되며 또한 벤토나이트 특성상 물을 흡수하는 특성으로 투수성 감소에 기여하기 때문임.
- ✓ 본 연구에서 사용한 화강풍화토는 사질토로서 문헌상 자료(김수문 등, 2000)와 비교하였을 때 벤토나이트의 사용량을 늘려야 폐기물 관리법(환경부, 2018)에서 지정하는 점토류를 사용하는 경우의 투수계수를 만족함.
- ✓ 매몰지조성지침상에 벤토나이트의 혼합을 언급하고 있지 않지만 일반적인 토양은 15% 사질토는 30~40% 벤토나이트 혼합시 차수성능이 향상되는 것으로 나타남.
- ✓ 본 연구에서는 시공성 개선을 위하여 살균효과와 동시에 차수기능을 갖고 있는 생

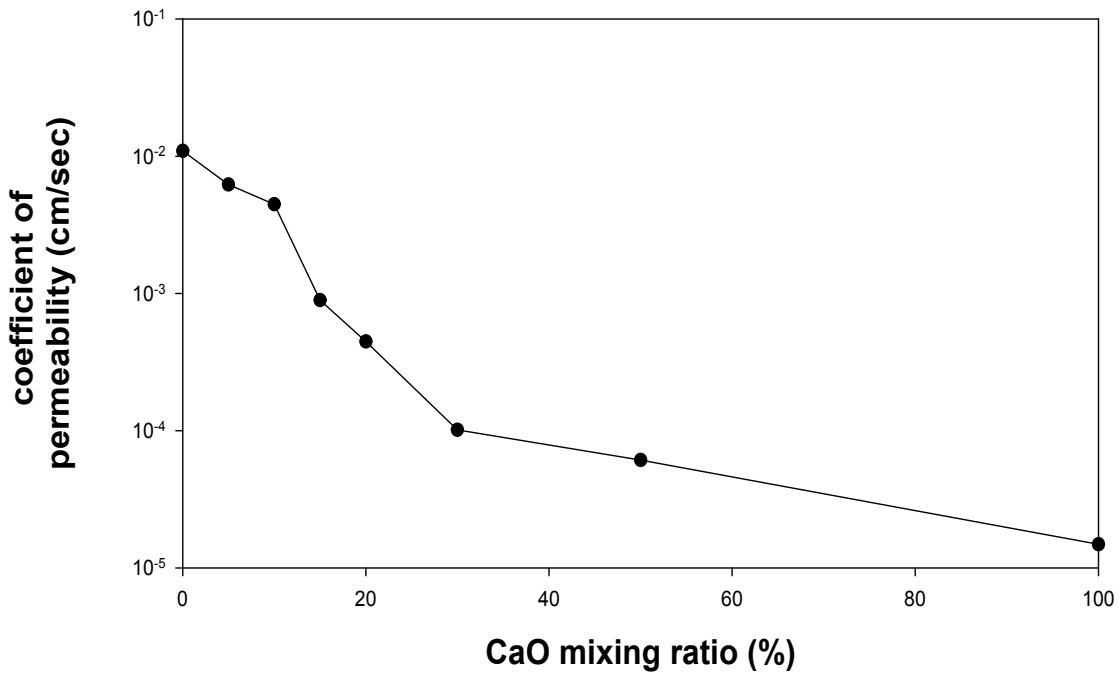
석회를 대상으로 화강풍화토와 혼합하는 경우 투수성을 측정함.

- ✓ 화강풍화토와 생석회를 섞은 혼합토의 투수계수 실험결과는 표 18에 요약함.

표 18 생석회와 화강풍화토의 무게혼합비율에 따른 투수계수

생석회 무게혼합비 (%)	투수계수 (cm/sec)
0	$1.1 \times 10^{-2}$
5	$6.2 \times 10^{-3}$
10	$4.5 \times 10^{-3}$
15	$8.9 \times 10^{-4}$
20	$4.5 \times 10^{-4}$
30	$1.0 \times 10^{-4}$
50	$6.1 \times 10^{-5}$
100	$1.5 \times 10^{-5}$

- ✓ 그림 61와 같이 생석회 혼합비가 증가할수록 투수계수가 감소하는 경향을 나타내는데 이는 생석회의 수화반응에 의해 체적이 증가하여 화강풍화토의 공극을 채워 조밀화되어 투수계수가 감소된 것으로 판단됨.
- ✓ 생석회와 점성토를 혼합하면 점성토는 흙의 구조가 단립화되어 변화되고 소성한계 증가 및 소성지수 감소되며 이로 인해 흙의 비배수전단강도가 증가하는 등 점성토의 공학적 성질이 개선됨(Rogers et. al., 2000).
- ✓ 일반적으로 생석회는 흙에 포함된 간극수와 반응하여 물을 흡수하고 열을 발생시켜 함수비가 감소되는데, 이 과정에서 생석회의 체적이 약 1.5~1.9배 증가되는 수화반응이 발생함.
- ✓ 생석회와 점성토를 혼합하면 생석회에 포함된  $Ca^{2+}$ 가 점토 입자 표면에서 점토 입자 표면에서  $K^+$ ,  $Na^+$ 과 교환현상이 발생하며, 점토 입자 표면에 흡착된  $Ca^{2+}$ 은 확산이중층 및 흡착수층의 두께를 감소시키고 점토 입자를 응집화하여 강도증가 및 액성한계감소, 소성한계 증가 등 소성도를 변화시키고 팽창성을 감소시킴.
- ✓ 생석회 30% 혼합으로도  $10^{-2}$  정도의 투수계수 감소를 보이며 그 이상의 혼합시 투수계수 감소폭이 줄어드는 경향을 보임. 생석회 100%일 때 투수계수가  $1.50 \times 10^{-5}$  cm/sec으로 생석회만의 포설시에는 매립지의 침출수 투수계수의 기준( $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec)을 만족하지 못하였지만 생석회는 불투수재료로 차수재로서의 가능성을 보임.



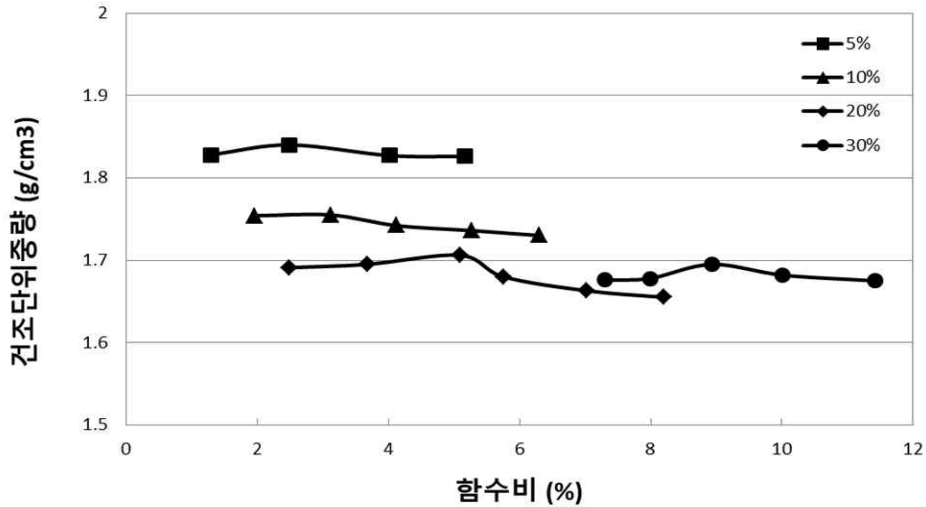
<그림 61> 생석회와 화강풍화토의 무게 혼합비에 따른 투수계수

## (2) 다짐시험

- ✓ 다짐시험은 일정한 에너지를 가하여 지반을 다질때에 최대건조단위중량과 이때의 최적함수비를 구하는 시험임.
- ✓ 지반은 다질 경우 흙 속의 공기량을 감소시키고 흙입자간의 거리를 근접시켜서 흙의 건조단위중량을 증가시키며 이에 따라 강도증가, 압축특성 개선, 지반의 지지력 증가, 투수성 개선, 부피변화 억제, 동상의 방지 등의 효과를 볼 수 있음.

- **화강풍화토=벤토나이트**

- ✓ 연구대상 화강풍화토와 벤토나이트 혼합비(5, 10, 20, 30 %)에 대한 최대건조단위중량과 최적함수비를 다음 표에 정리함.
- ✓ 위의 결과 모두 벤토나이트의 혼합량이 증가할수록 최대건조단위중량은 감소하고 최적함수비는 증가하는 결과를 볼 수 있음.
- ✓ 연구대상 화강풍화토와 벤토나이트 혼합비에 대한 최대건조단위중량과 최적함수비는 다음 그림 62 및 표 19과 같음.



<그림 62> 벤토나이트 무게 혼합비에 따른 혼합토의 건조단위중량

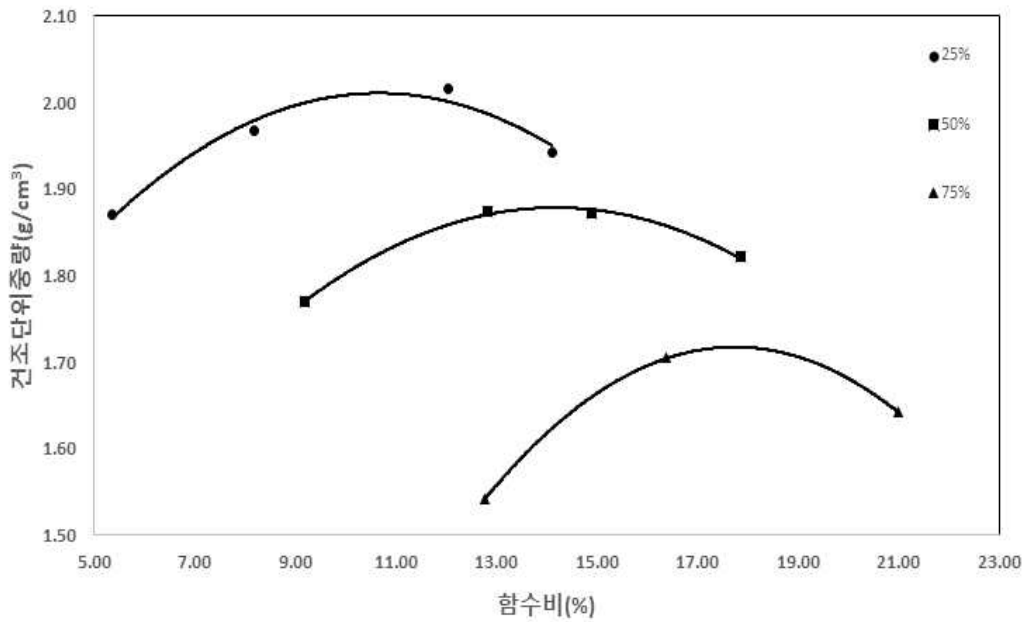
<표 19> 혼합차수재의 최대건조단위중량과 최적함수비

혼합비	D.M.D (g / cm <sup>3</sup> )	O.M.C (%)
SP soil	1.86	1.61
SP soil + 5 % bentonite	1.840	2.48
SP soil + 10 % bentonite	1.755	3.11
SP soil + 20 % bentonite	1.706	5.09
SP soil + 30 % bentonite	1.695	8.93

- ✓ 최대 건조단위중량 감소의 원인은 벤토나이트 혼합량 증가에 따른 비중 감소와 벤토나이트의 부피 팽창으로 인한 밀도 감소로 판단됨.
- ✓ 최적함수비의 증가 원인은 친수성이 큰 벤토나이트 혼합량의 증가에 따라 보유되는 물의 양이 많이 지기 때문으로 판단됨.
- ✓ 실험의 결과 중 함수비가 참고문헌(김수문 등, 2000) 보다 현저히 낮은 값으로 측정되었는데 이는 참고문헌의 SM으로 분류된 흙은 세립토 함량이 15.1%으로 채취한 토양이 세립토 함량인 1.95% 보다 상당히 높은 값을 보이고 있기 때문이라고 판단됨.
- ✓ 참고문헌 보다 더 많은 벤토나이트를 혼합하였음에도 불구하고 함수비가 현저히 낮은 이유는 연구에 사용된 벤토나이트의 품질이 좋지 않기 때문으로 판단됨.

- 화강풍화토=생석회

- ✓ 다짐시험 결과 생석회 0%혼합을 제외하고 생석회의 혼합량이 증가할수록 최대건조단위중량은 감소하고 최적함수비는 증가하는 경향을 보였음.
- ✓ 최대 건조단위중량의 감소 원인은 화강풍화토보다 비교적 비중이 작은 생석회의 혼합비가 증가함에 따라 혼합토의 상대적인 비중 감소 및 수화반응으로 인해 생석회의 체적이 1.5~1.9배 증가로 화강풍화토의 공극을 채운 것으로 판단됨.
- ✓ 최적함수비의 증가 원인은 화강풍화토보다 비교적 친수성이 큰 생석회의 혼합량의 증가에 따라 보유되는 물의 양이 많아지기 때문으로 판단됨.



<그림 63> 생석회 무게 혼합비에 따른 혼합토의 건조단위중량

<표 20> 혼합차수재의 최대건조단위중량과 최적함수비

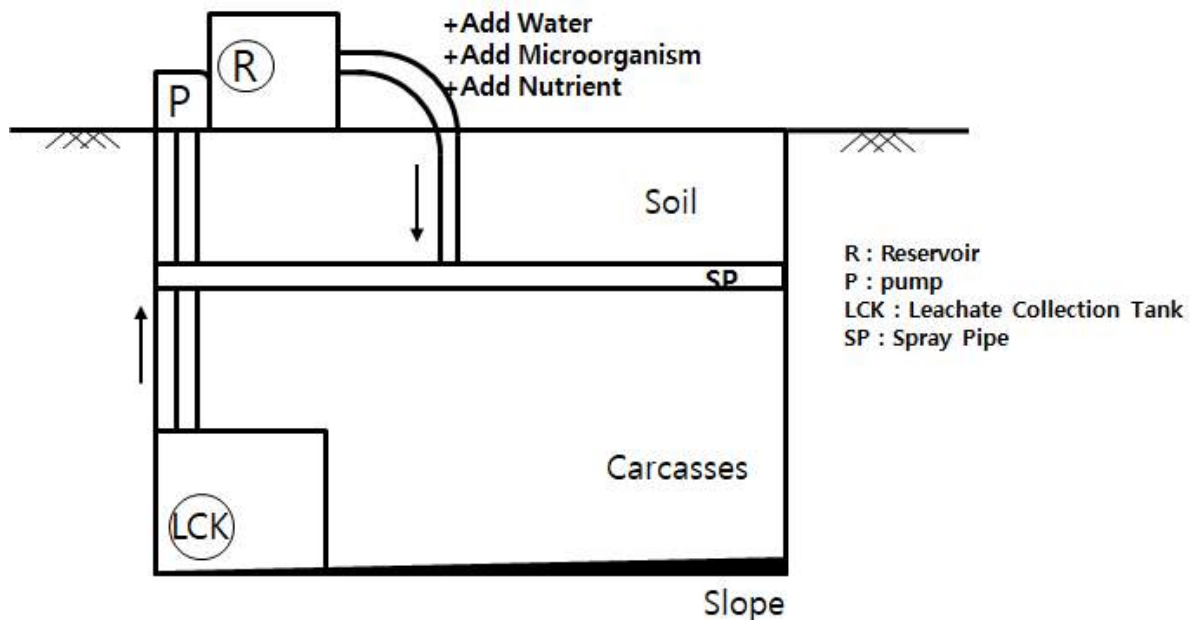
혼합비	D.M.D (g / cm <sup>3</sup> )	O.M.C (%)
SP soil + 25 % CaO	2.01	10.71
SP soil + 50 % CaO	1.89	14.31
SP soil + 75 % CaO	1.72	17.75

## 2-6. 사축의 분해 조건을 조성하기 위한 매몰지 개선방안 도출

### 1) 매몰지 내로 지하수가 침투되는 경우 이를 배제하기 위한 방법

#### (1) 매립지 공법 고찰

- ✓ 기존의 사용종료된 매립지의 유지관리부족에 따라 문제점은 대표적으로 미분해되어 매립부지를 재사용 불가능한 경우, 유기물이 분해되어 생기는 매립가스와 폐기물이 용탈되어 배출되는 침출수에 의한 환경오염이 있음.
- ✓ 가축매몰지는 유기물이 다량 포함된 폐기물로 볼 수 있으며 매립지와 동일한 문제가 발생하고 있음.
- ✓ 이에 따라 매립지의 정화공법을 참고하여 적용방을 마련할 필요성이 있음.
- ✓ 문헌연구에 따르면 매립지오염을 안정화 시키는 공법으로 크게 현지안정화와 조기안정화가 있음.
- ✓ 조기 안정화 공법은 공통적으로 호기성 미생물의 최적 성장조건을 만족하기 위한 환경을 조성하여 사체분해를 촉진시키는 것에 중점을 두고 있음.
- ✓ 이 공법은 매립지 내에서 장기간에 걸쳐 안정화가 진행되는 기간을 단축시키는 장점이 있지만 비용이 많이 들며 시설관리가 필요함.
- ✓ 현지안정화의 경우 차수재, 차수벽 등을 설치하여 오염확산을 방지하는 데 대해 중점을 두고 있음.
- ✓ 단점으로 장기적으로 주변 환경의 오염원으로 존재하게 된다.



<그림 64> 매몰지개조 모식도

- ✓ 그림 64은 기존의 미분해 매립지를 해결하기 위해 매립지 공법 중 침출수 재순환을 참고하여 가축사체 분해촉진을 위한 매몰지 개조모식도임.
- ✓ 기존의 매몰지 조성방안에서 하단부의 저류조에 관수와 펌프를 연결하여 침출수가

재순환되도록 설계하였음.

- ✓ 침출수 재순환이 원활하지 않을 경우 Water, Microorganism, Nutrient을 추가적으로 공급하며 Spray Pipe을 통해 매몰지 내부에 골고루 주입 및 살포되도록 하였음.

## (2) 매몰지 조성재료 고찰

### • 생석회

#### 생석회-점토 반응

- ✓ 생석회는 점성토 지반의 개량을 위하여 지반개량제로 많이 활용하고 있으며 탈수 및 팽창으로 인한 지지력 증대를 촉진시킬 수 있음(Boardman et al., 2001).
- ✓ 생석회와 점성토를 혼합하면 점성토는 흙의 구조가 단립화되어 변화되고 소성한계 증가 및 소성지수 감소되며 이로 인해 흙의 비배수전단강도가 증가하는 등 점성토의 공학적 성질이 개선됨(Rogers et. al., 2000).
- ✓ 일반적으로 생석회는 흙에 포함된 간극수와 반응하여 물을 흡수하고 열을 발생시켜 함수비가 감소되는데, 이 과정에서 생석회의 체적이 약 1.5~1.9배 증가되는 수화반응이 발생함.
- ✓ 생석회와 점성토를 혼합하면 생석회에 포함된  $Ca^{2+}$ 가 점토 입자 표면에서 점토 입자 표면에서  $K^+$ ,  $Na^+$ 과 교환현상이 발생하며, 점토 입자 표면에 흡착된  $Ca^{2+}$ 은 확산이중층 및 흡착수층의 두께를 감소시키고 점토 입자를 응집화하여 강도증가 및 액성한계감소, 소성한계 증가 등 소성도를 변화시키고 팽창성을 감소시킴.

#### 생석회의 특성

- ✓ 생석회는 석회석을 1,000 ~ 1,200 °C 정도의 고온으로 가열했을 때 이산화탄소( $CO_2$ )가 빠져나가면서 생성되는 물질임.
- ✓ 생석회는 소독제, 표백제, pH 조절제, 식품첨가제, 비료 등에 사용됨.
- ✓ 현재 생석회는 매몰지 조성시 투입되어 pH를 높여 병원성 바이러스의 사멸이나 병원성 미생물의 사멸에 도움을 주는 것으로 알려져 있음.
- ✓ 발열반응으로 인해 온도를 높여 이러한 병원성 미생물과 바이러스의 번식을 억제시키기 위해 사용을 권장하고 있으며 생석회는 가축매몰지 환경관리지침에 따르면 매몰지 바닥 중간 부위에 5 cm를 투입하여 침출수 차단재로 사용하고 있음.

#### 생석회의 생물학적 분해에 대한 영향

- ✓ 가축매몰지에 생석회를 사용하는 일반적인 이유는 생석회가 멸균기능이 있기 때문임.
- ✓ 일반적으로 석회는 토양개량제로 사용되어 왔으며, pH를 증가시키기 때문에 산성 토양의 개량이 주로 활용되어 왔음.
- ✓ 토양의 석회처리는 토양유기물의 분해를 증가시키는 효과가 있다고 알려져 있어 이런 이유로 사체의 분해속도를 증가시키기 위해 석회를 사용하기도 함.
- ✓ 강염기 토양에서는 미생물의 증식이 억제되는 것으로 알려져 있으며, 이러한 이유

로 가축 사체의 매몰시 소독제로 사용하고 있음.

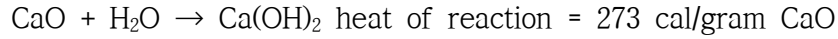
- ✓ 세계보건기구에서는 염소소독 대신 석회를 사용한 소독의 효과가 미비하다고 판단하여 사용자제를 권고하고 있음.
- ✓ 석회를 사용하면 수화된 석회는 염기성 환경을 만들고, 사체의 시랍(adipocere) 형성을 억제하고 분해를 저해함.
- ✓ 염기성 환경에서 pH가 증가하여 미생물 농도 자체가 높지 않아 사체의 분해 속도가 느려지며 따라서 생석회를 사용하면 돼지 사체의 분해속도를 늦추게 됨.
- ✓ 결국 석회를 사용하면 살균효과를 기대할 수 있으나 사체의 분해 속도 자체를 늦출 수 있다는 우려가 있음.
- ✓ 석회는 수화나 소성 과정을 거치면서 다양한 형태로 변화됨.
- ✓ 석회석이 소성과정을 거쳐서 이산화탄소가 떨어져 나간 형태가 생석회(CaO)이며 생석회가 수화된 것이 소석회(Ca(OH)<sub>2</sub>)임.
- ✓ 소석회가 공기중에 노출되면 물이 떨어져나오고, 이산화탄소와 반응하여 석회석이 형성된다. 생석회가 물과 반응하면 소석회를 만들면서, 열을 내고 pH 12~13로 즉시 증가시킴.
- ✓ 돼지 사체에 생석회와 소석회 그리고 석회처리를 하지 않은 3가지 경우에 대해 6개월 후의 사체 상태를 보면 석회처리를 하지 않은 돼지 사체의 분해가 가장 많이 진행되었고, 소석회 처리가 생석회보다는 더 많이 진행됨.
- ✓ 사체 분해의 단계로 보면 초기 단계에 해당한다고 볼 수 있고 석회와 직접적으로 접촉하지 않은 아래 그림에서는 부패가 더 많이 진행되었으며 결국 사체가 부패되는 것을 방지함(Schotsmans et al., 2012).





<그림 65> 사축분해 형태 (a) 석회처리를 하지 않은 경우, (b) 소석회처리한 경우, (c)생석회를 처리한 경우(Schotsmans et al., 2012)

- ✓ 석회를 처리하는 또 다른 이유는 병원성 미생물의 사멸에 관여할 수 있기 때문임.
- ✓ 석회를 처리하면 pH가 급격히 증가하며 pH가 증가하면 *E. coli O157:H7*과 같은 그람 음성균의 세포질막을 파괴시켜 사멸시킬 수 있음.
- ✓ 생석회과 물과 반응하게 되면 발생하는 열로 인해 주변의 온도가 급격히 올라가며 이러한 온도변화로 인해 병원균의 사멸을 유도할 수 있음.
- ✓ 온도의 증가는 수분의 증발을 증가시켜 미생물의 성장 자체를 억제할 수도 있음.
- ✓ Paluszak and Bauza-Kaszewska (2011)의 연구에 의하면 35%의 건조 중량을 가진 가금류를 물과 혼합하고 CaO 25wt%를 첨가하여 교반한 경우 혼합물의 온도를 27.2 °C에서 37.7 °C까지 증가시키는 효과를 가져왔으며 pH도 12 이상으로 증가하였음.
- ✓ 이로 인해 대장균과 같은 분변성미생물의 성장을 감소시키는 효과를 확인할 수 있으나 가축매몰지에서의 혐기성 분해 과정에서 유기산이 배출되고 이러한 유기산으로 인해 실제 pH 상승은 높지 않을 수도 있음.
- ✓ 석회를 사용할 때 우려되는 다른 한가지 문제는 석회의 수화반응이 발열반응이며 이러한 발열반응으로 차수재 비닐의 손상을 가져올 수 있음.
- ✓ 실제로 석회의 발열 반응은 다음과 같이 표현할 수 있음.



- ✓ 사체의 70%가 물로 구성되어 있으며, 고상과 액상의 비열이 다르긴 하지만, 모두 물과 비슷한 수준의 비열이라고 가정한다면, 100 kg 짜리 돼지 1마리의 온도를 1 °C 올리기 위해서는 최대 100,000 cal가 필요함.
- ✓ 100 kg 당 1 kg의 석회를 사용하고 이들 석회가 모두 반응한다면 온도 상승은 2.73 °C로 예측할 수 있음.
- ✓ 가축매몰지 환경관리지침에 따르면 석회를 사체와 완전히 교반하는 것이 아니라 층을 형성하여 살포하도록 하고 있음.
- ✓ 사용된 석회의 일부분만이 수화반응을 겪게 될 가능성이 높다고 할 수 있으며 이 렇게 층 형태로 석회를 사용하게 되면 생석회의 수화반응으로 인해 lime cast가 형 성되어 배수가 되지 않는 층이 형성될 가능성이 있다고 판단됨.
- ✓ 이상의 문헌조사 결과를 정리하면 생석회의 수화반응으로 인한 온도 상승은 크지 않으며, 수화반응으로 인하 차단 필름의 용융 현상이 실제로 발생할 가능성이 매우 낮다고 판단됨.
- ✓ 바이러스의 사멸을 위한 소독제의 효과는 분명히 기대할 수 있으나, pH의 상승으 로 인한 분해 미생물 개체수의 감소로 가축사체 분해 속도의 저해 가능성이 있다 고 판단됨.

#### • 벤토나이트

- ✓ 벤토나이트(bentonite)의 광물학적 명칭은 몬모릴로나이트(montmorillonite)이며 처 음 프랑스에서 발견 되었으나 Fort Benton 지방의 근처에서 광맥이 처음 발견되어 이 지방의 명칭을 붙여 벤토나이트라고 불림.
- ✓ 벤토나이트의 색상은 회색 노란색, 초록색, 적색 등으로 다양하나 벤토나이트의 색 상이 품질에 영향을 주지 않음.

#### 물리적 특성

- ✓ 벤토나이트는 물과 접촉하면 수화작용에 의해 부피가 건조상태의 13~16배까지 팽 창하며 무게의 5배까지 물을 흡수함(김광일 외, 2010).
- ✓ 벤토나이트를 크게 칼슘계(Calcium)와 소듐계(Sodium)가 많이 사용되는데 그 중 에서도 수밀성과 수화성이 우수한 소듐계 벤토나이트를 사용함으로써 수밀성과 수화성이 우수한 차수효과를 얻을 수 있음.
- ✓ 국내산 벤토나이트들은 제올라이트, 단백질, 장석류가 주요 불순물을 이루며 25 wt% 이상 함유하며 암모늄아세테이트법에 의해 측정된 Total CEC값은 5~115 meq/100 g)임(노진환, 2002).

#### 화학적 특성

- ✓ 벤토나이트는 몬모릴로나이트(montmorillonite) 계통의 팽창성 3층판(Si-Ai-Si)으로 이루어진 점토이며 납석(Pyrophyllite) 화학 구조식인  $\text{Al}_2\text{Si}_4(\text{OH})$ 로 형성되며 그중

Aluminum oxide 중간층인 Gibbsite layer에서 +3가인 Aluminum이 +2가인 Magnesium으로 대체되고 -1가 만큼의 부족한 전하를 Na로 만족시킨 형태가 Na-Bentonite이고 Ca로 만족시킨 형태가 Ca-벤토나이트임.

- ✓ Na-벤토나이트는 수화되면 상대적으로 Ca-벤토나이트 보다 높은 분산성향 및 팽윤도, 소성 및 유연성을 나타냄.
- ✓ 벤토나이트의 팽창 원리는 벤토나이트의 중간층인 Gibbsite 층에서 발생하는 전하의 불균형으로 인하여 벤토나이트 각층의 모서리는 양성(+), 표면은 음성(-)이 존재하는 양극성이 띄게되며 이 양극성으로 인하여 물분자를 끌어당겨 흡착하게 되며 이 물분자는 다시 더욱더 많은 물 분자를 끌어 당기게 되어 벤토나이트 층간의 공간으로 물분자가 흡착, 판구조로 되어 있는 벤토나이트 구조가 하우스 구조(House of Card 구조)로 변화하게 되어 부피가 증가하게 됨.

• 폐기물 매립시설관련 개선사례

- ✓ 폐기물 매립시설관련 개선사례는 매립시설 시공에 따른 문제점과 이에 대한 개선책이 제시되어 있어 가축매몰지를 조성함에 있어서도 기술적으로 개선될 것으로 보임(환경관리공단, 2004).
- ✓ 현행 규정은 매립장 바닥구배는 최소 2%이상으로만 규정하고 그 상한선에 대한 제한을 두지 않았으나 구배가 너무 크면(약 5%이상) 차수시설 설치 공사시는 물론 후속공사, 매립복토시 등 상재하중에 의해 많은 문제를 야기하므로 설계시 적절한 바닥구배 설정이 매우 중요함.
- ✓ 바닥구배가 클 경우에는 차수막의 표면이 마찰력이 적어 미끄러짐 현상이 발생되어 차수막 손상을 초래할 수 있으므로 매립장 바닥구배를 알맞은 구배(2~4%)로 조정하여 시공하여야 함.
- ✓ 매립장 운영관리비에서 침출수 처리비용이 차지하는 비중은 매우 크며 중소형 매립장일 경우 그 비율은 대형 매립장보다 훨씬 증가함.
- ✓ 복토면을 비닐 등으로 덮는 이유는 다짐 미흡에 의한 빗물 침투나 세굴 방지 목적으로 설치하는 것은 권장할 사항은 아니나, 일일복토 후 방수막을 덮을 경우 해충 방제 효과도 있으므로 매우 효과적임.
- ✓ 효율적인 빗물배제 방법을 심도 있게 검토하여 시공한 사례에 따르면, 내부사면 굴착시 원활한 빗물배제가 될 수 있는 소단구배(2~3%)로 시공하였고, 소단배수로의 하류에는 집수조를 설치하여 사면부의 빗물을 집수하여 펌프로 자동배제 될 수 있도록 하였으며, 침출수량 저감을 위해 매립장 바닥에 소제방을 축조하여 매립진행 구역과 비매립구역을 분할한 것 등은 빗물배제량이 극대화될 수 있는 요소들임.
- ✓ 침출수가 유출되는 것을 방지하기 위하여 매립시설의 바닥 및 측면에 보조차수시설을 설치하는 것은 매립시설에서 차수막 파손에 대비한 최종 차수기능을 담당하므로 혼합토 또는 고화토(사면은 토목합성수지점토류라이너) 층의 시공두께, 다짐 밀도, 투수계수 등 품질관리는 매우 중요한 의미를 가짐.
- ✓ 매립장의 바닥은 면고르기 작업을 철저히 하여 최대한 평탄하게 시공하여야 점토류 라이너층의 두께를 균일하게 할 수 있으므로 암반 등 돌출부가 있다면 완전히

제거 후 여굴부위를 평탄하게 성토하고 혼합토층을 시공하여야 하며, 사면은 암반층이 있는 부분에 슛크리트 타설 등의 방법으로 요철처리 공사를 선행한 후 후속 공사를 진행하여 돌출부위에 의한 차수막의 손상이 없도록 대비함이 중요함.

- ✓ 매립장내 설치되는 집수정 및 가스포집공은 단순히 침출수 집수 및 가스포집의 기능만 담당하는 것이 아니라 매립층에 형성되는 침출수를 매립장 바닥 차집관로까지 원활하게 유도하는 기능도 겸해야하므로 반드시 충분한 투과량을 가질 수 있는 유공관을 설치하여 침출수위의 상승억제와 원활한 차집기능을 할 수 있도록 하여야 함.
- ✓ 매립장 바닥과 사면에서 지하수가 발생하게 되면 양압력이 작용하여 점토류라이너층과 차수막이 파손될 수 있기 때문에 지하수배제시설 설치에 반드시 필요함.
- ✓ 특히 매립장 내부사면은 평상시 지하수가 발생치 않더라도 강우 후 간헐적으로 발생하는 경우도 있으므로 사후에 더 큰 문제가 발생되지 않도록 공사기간 중 세심하게 관찰하여 조금이라도 발생할 가능성이 있다면 차수시설 설치이전에 지하수배제시설(유공 맹암거, 콘크리트 도수로 등)을 설치하여야 한다.
- ✓ 지하수 검사정은 매립시설의 부대시설에 불과하지만 차수시설 손상 등에 의한 침출수 누출여부를 확인하기 위한 감시기능으로서 대단히 중요한 시설임.
- ✓ 그 기능을 다하기 위해서는 매립장 하류부 가까운 곳에 지하수흐름층을 찾아 설치하되 그 깊이는 최대 암반층 상부(검사정 하단이 불포화대 내에 위치)까지만 굴착, 설치해야 그 설치목적에 부합될 수 있음.
- ✓ 검사공 굴착시 대수층내 지하수 흐름층을 찾는 것이 중요하며, 지형이나 지반 특성상 건기시 지하수가 발생할 수 없는 특수한 지형이라면 매립장 하류 인접한 곳에 설치하되 강우종료 일정시간 경과 후 검사정의 시료를 채취하여 오염여부의 모니터링을 하는 것이 타당할 것임.

## 2) 매몰지 침출수 재순환 등 기존 매립지공학에서 제시되고 있는 방안 검토

### (1) 매립공법의 결정 시 고려사항

- ✓ 매립공법을 개발하는데 있어서 가장 중요한 것은 매립지가 수행하여야 할 기능 중에서 어떠한 기능을 강조할 것인가에 대한 분명한 목표를 설정하여야 함.
- ✓ 폐기물매립지가 갖추어야 할 기능은 다음과 같음.

- 적절한 장소에 충분한 처분용량을 확보하여 자연환원처리가 이루어질 수 있는 보관·처리의 기능을 보유
- 유해물질 등이 반입될 경우를 대비하여 환경오염에 대한 차단벽으로서의 역할을 담당할 수 있는 환경보전의 기능 필요
- 매립폐기물과 매립부지는 잠재자원이므로 자원회수의 기능 충족
- 폐기물매립지의 확보가 곤란한 상황에서는 지역주민들에게 혜택을 줄 수 있는 지역환원의 기능 충족

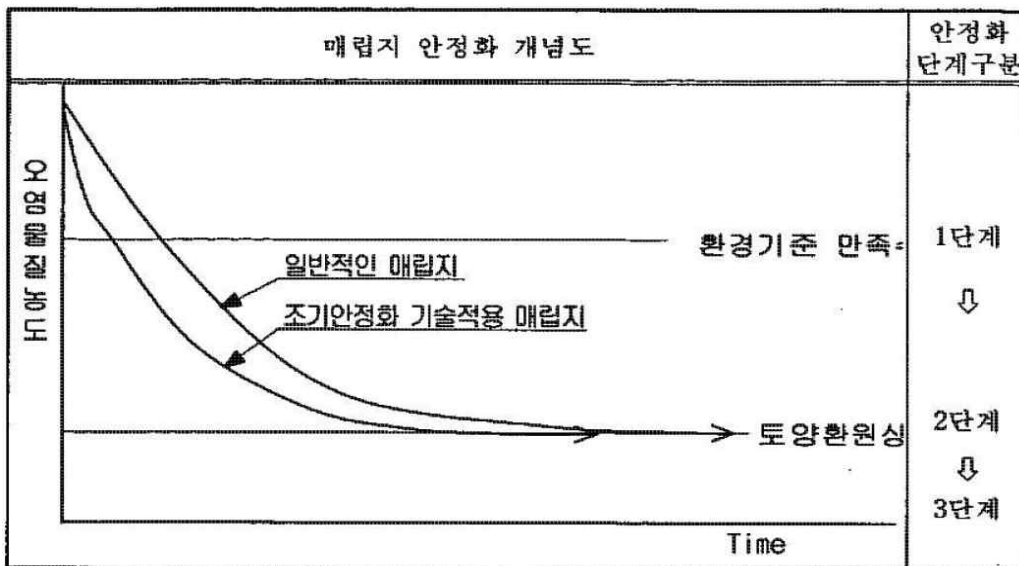


<그림 66> 매립지의 기능

## (2) 폐기물 매립지 안정화 공법

- ✓ 폐기물 매립지의 안정화란 매립된 폐기물이 장기간에 걸쳐 물리·화학적, 생물학적 분해 작용을 받아 유기물은 분해되어 가스화되거나 침출수로 배출되고, 무기물과 중금속류는 용탈되어 최종적으로 침출수로 배출되면서 매립지반이 침하되고 최종적으로 토양과 같은 상태로 환원되는 것을 말함.
- ✓ 매립 폐기물의 안정화 단계를 보면 그림 67 및 아래와 같음.

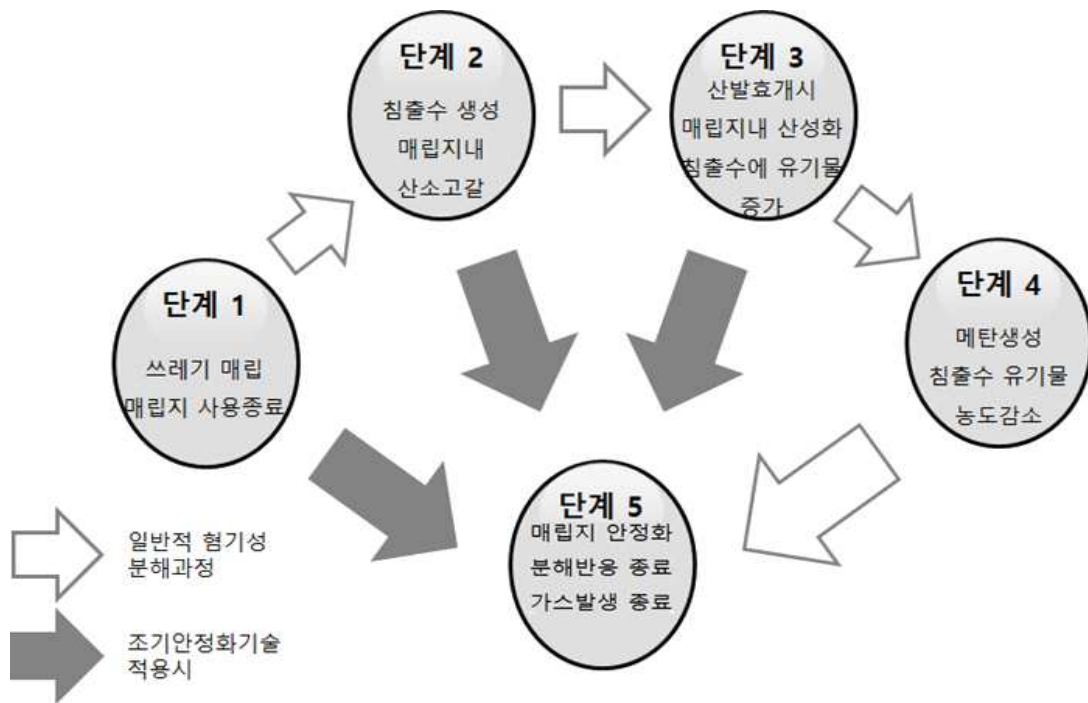
- 1단계 : 침출수나 매립가스를 정화하는 등의 매립지 유지관리를 하지 않아도 환경에 미치는 영향을 무시할 수 있는 단계
- 2단계 : 땅 속에 머물러 있는 한 외부에 영향을 미치는 변화를 일으키지 않는 상태
- 3단계 : 폐기물을 굴착해 대기나 강우에 노출시켜도 환경에 영향을 미칠 수 있는 변화가 일어나지 않는 토양환원 상태



<그림 67> 매립지 안정화 단계 (KONETIC, 2006)

- **조기안정화**

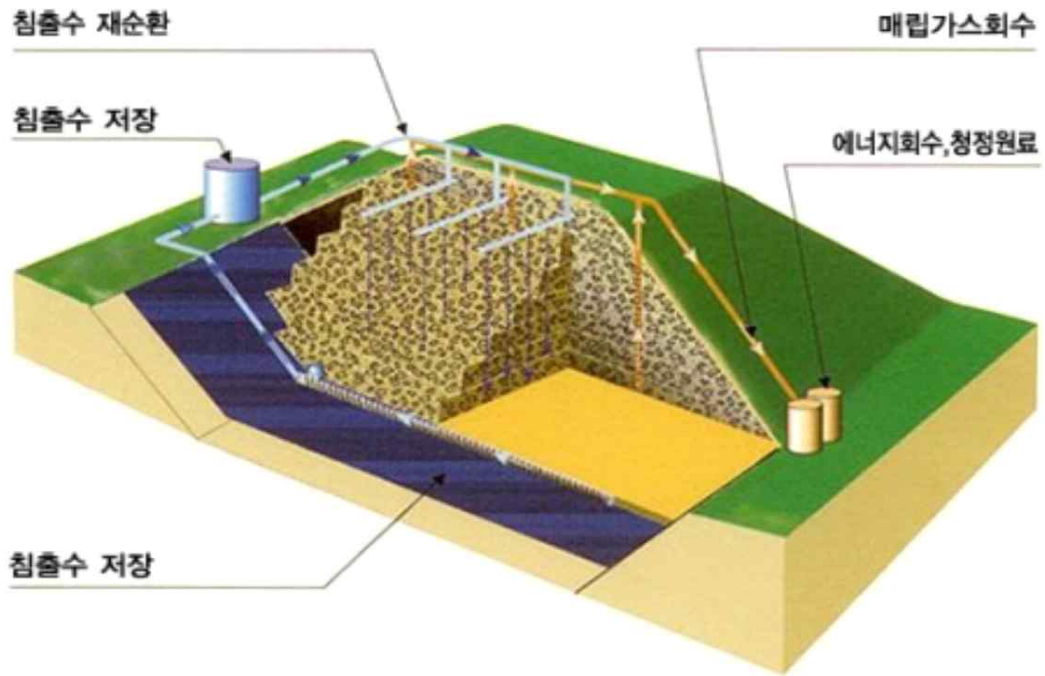
- ✓ 기존의 사용종료된 불량매립지 등의 정비방법은 굴착 후 선별하는 이적처리 방법과 차수막, 차수벽의 설치, 가스배제 등으로 오염확산을 방지하는 현지안정화 방법이 대부분이며, 이러한 방법들은 환경적으로 오염부하 저감효과가 적거나 장기적으로 주변 환경의 오염원으로 존재 할 가능성이 큼.
- ✓ 불량매립지는 매립지 내에서 장기간에 걸쳐 여러 단계로 진행되는 안정화 기간을 단축시켜 매립지를 조기에 안정화함으로써 매립지를 주변 환경오염에 영향을 주지 않는 상태로 전환시키는 조기안정화 기술이 필요함.



<그림 68> 조기안정화 기술 적용 개념도 (KONETIC, 2006)

- **침출수 재순환**

- ✓ 침출수 재순환은 그림 69과 같이 매립지에서 발생한 침출수를 폐기물 매립층의 표면 또는 매립층의 내부로 반송하여 폐기물 매립층을 통과시킴으로써 발생하는 침출수량의 삭감 및 정화하여 매립지의 안정화 촉진을 도모하는 방법으로 주로 미국, 일본 및 독일 등에서 연구가 활발히 추진되고 있음.

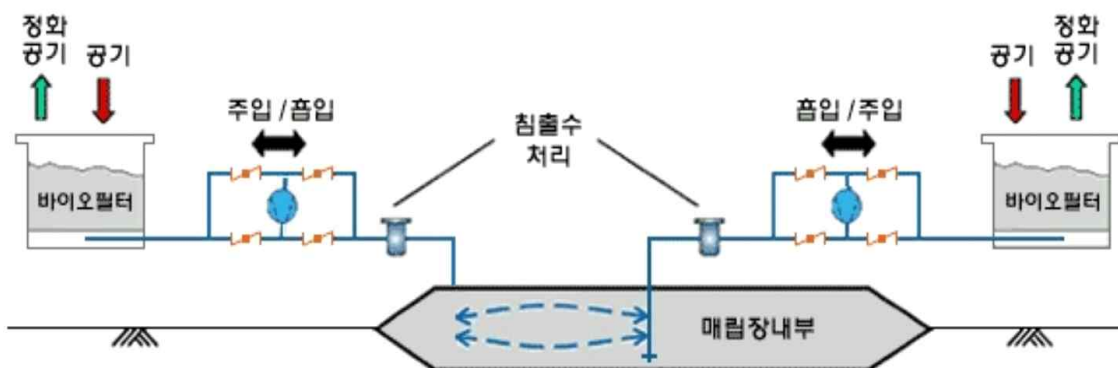


<그림 69> 침출수 재순환시설 모형도 (㈜케이백코리아)

- ✓ 침출수 재순환이 일어나는 경우 혐기성 분해를 촉진시켜 침출수를 정화하고 매립지 안정화 및 조기 침화에 의한 오염물질의 감소를 기대할 수 있음.
- ✓ 단점으로 혐기성 분해로 인한 악취, 다른 공법에 비해 분해가 느리며 재순환을 위해 원활한 투수성이 확보되어야 함.

• 악취안정화 공법

- ✓ 불량, 비위생 매립장 정비·복원공사시 매립장 가스의 안정화 및 매립장 내부를 혐기성 상태에서 호기성 상태로 조기 안정화시키는 공법으로 공법원리는 매립장 내부에 생긴 악취가스와 유해가스를 뽑아내어 Biofilter로 제거하고 또한 Biofilter 내의 호기성 미생물을 동반하고 있는 산소가 풍부하고 따뜻한 공기를 매립장 내부로 주입하여 매립장을 혐기성 상태에서 호기성 상태로 바꾸어 안정화 함.

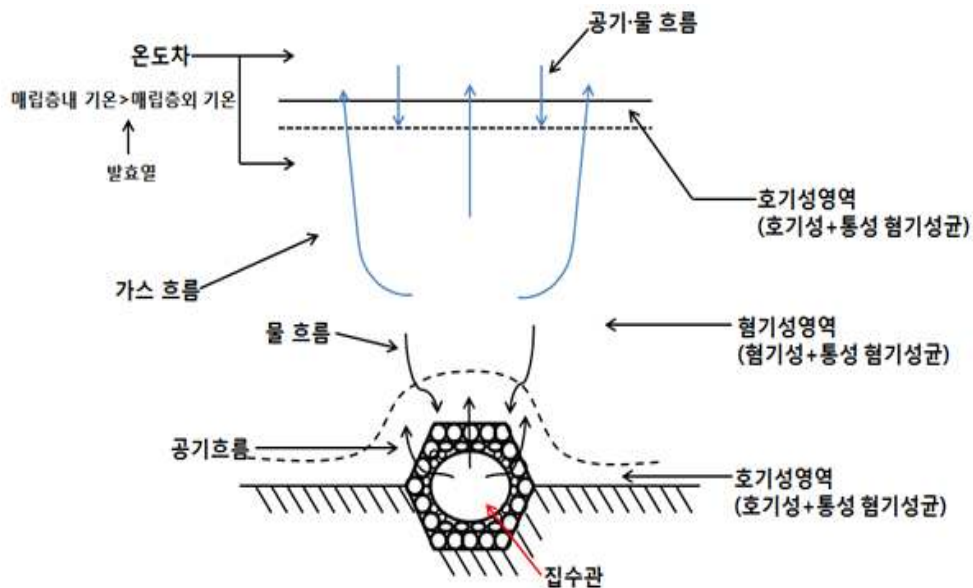


<그림 70> 연속공기주입법 공정도 (㈜아이유티)

- ✓ 일반적으로 매립지 내부에 혐기성 분해로 인해 생기는 매립가스로 인해 대기오염, 악취, 폭발 등의 위험이 있는 경우 악취안정화 공법을 사용하며 다른 공법에 비해 비교적 고비용이 소모되는 단점이 있음.

• **준호기성 매립공법**

- ✓ 준호기성 매립공법은 그림 71에서 보는 바와 같이 매립지 저부 집수관을 통해 공기가 밀도차에 의해 자연적으로 매립층 내에 공급되어 집수관 근방에 호기성 영역을 형성하여 호기성분해를 촉진시키는 공법임.
- ✓ 이 공법은 경제성도 높고 유지관리도 용이한 것으로 평가되어 일본에서 약 50%의 매립지에서 사용하고 있음.
- ✓ 강제로 공기를 주입하는 공기주입법과 다르게 밀도차에 의한 공기전달 형식이므로 복토 및 폐기물층의 통기계수를 고려해야하며 평지 매립지에 적합함.



<그림 71> 준호기성 매립시스템(삼성물산(주) 건설기술연구소, 1996)

• **현지안정화**

- ✓ 현지안정화 기술은 매립지에서 발생하는 침출수 및 발생가스가 주변의 토양 및 지하수 등으로 유출되는 것을 방지하기 위해 차수시설을 설치하며 주로 대규모 매립지나 정비를 서두르지 않아도 되는 매립지의 경우에 적용함.
- ✓ 차수시설은 표 21과 같이 일반적으로 수평차수시설과 수직차수시설로 구분하며, 재료의 종류에 따라 점토차수재, 합성 차수막, 토목섬유-점토 차수재, 혼합 차수재 등으로 구분함(이남훈 등, 2005).



<표 21> 차수시설의 분류(이남훈 등, 2005)

분류	
수평 차수재	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 점토 차수재(clay liner)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 자연점토 차수재(natural clay liner)</li> <li>- 다짐점토 차수재(compactd clay liner)</li> </ul> </li> <li>○ 합성 차수막(Geomembrane)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 열가소성(thermoplastics): PVC, EIA</li> <li>- 결정질 열가소성(crystalline thermoplastics): HDPE, MDPE, LDPE</li> <li>- 열가소성 탄성중합체(thermoplastics elastomers): CPE, CSPE                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 탄성중합체(elastomers): EPDM, IIR</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>○ 토목섬유-점토 차수재(geosynthetic clay liner)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 합성섬유(geotextile)와 벤토나이트 결합재: bento-mat, claymax, geobent</li> <li>- 합성차수막(geomembrane)과 벤토나이트 결합재: paraseal, gundseal</li> </ul> </li> <li>○ 혼합 차수재                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 흙-벤토나이트</li> <li>- 흙-시멘트</li> <li>- 흙-모래 아스팔트</li> <li>- 플라이애쉬 혼합재</li> <li>- 아스팔트 콘크리트                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 콘크리트</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
연직 차수재	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 시트파일(sheet pile)</li> <li>- 슬러리월(slurry wall)</li> <li>- 토양혼합월(soil mixed wall)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 그라우트커톤</li> </ul> </li> <li>- 합성수지 차수막(geomembrane)</li> </ul>

- 수평채수재

- 점토 차수재

- ✓ 점토 차수재는 소정의 차수성과 다짐도를 가진 자연점토 차수재와 소정의 차수성과 다짐도를 가지지 못하여 인위적으로 다짐을 가한 다짐점토 차수재가 있음.
  - ✓ 자연점토 차수재는 매립장 기초지반에 자연적으로 형성된 원점토 지반으로서 내륙 지역의 양질의 점토 또는 해안지역의 해성점토를 예로 들 수 있음.
  - ✓ 다짐점토 차수재는 매립장 기초 지반의 현장토가 차수재로서 적합하지 않은 경우에 현장 내 또는 현장 외부에서 점토를 채취하여 다짐한 것임.

물리적 특성

- ✓ 흙의 성질은 함수량에 따라 크게 좌우된다. 특히, 실트분과 점토분을 다량으로 포함하는 세립토에서는 함수비의 대소에 따른 흙의 연경도에 의해 성질이 크게 좌우됨.
- ✓ 따라서 폐기물매립장의 차수재로 사용되는 점토는 연경도가 어느 정도 되는지 검토되어야 함.

화학적 특성

- ✓ 대부분의 점토는 규소, 알루미늄, 마그네슘 및 철 등의 성분으로 구성되어 있으며 얇은 판모양의 결정구조로 사면체구조와 팔면체구조 두 종류의 기본 단위체로 구성되어 있음.
- ✓ 점토광물은 단위 셀의 높이에 따라 kaolinite, smectite, illite, chlorite 등의 군으로 분류됨.
- ✓ 흙은 기본적으로 고유의 흡착성 및 양이온 교환능력을 가지고 있기 때문에 점토차수재의 경우 침출수 내의 오염물질을 자체적으로 정화 시킬 수 있는 특성을 가지고 있음.

재료기준

- ✓ 폐기물관리법(환경부, 2018)에서 점토 차수층을 사용하는 경우 다음의 사항을 요구하고 있음.

투수계수:  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하

세립토 함량 : 39~50%

자갈함량 : 20~25%

소성지수 : 7~10%

최대입경 : 25~50 mm

- 토목섬유-점토 차수재 (geosynthetic clay liners, GCL)

- ✓ 일반적으로 GCL은 벤토나이트를 니들링(needling), 스티칭(stitching), 화학 접착제(chemical adhesive) 등으로 지오텍스타일 또는 합성수지 차수막 사이에 역학적으로

지지될 수 있도록 만든 제품을 말함.

- ✓ CL의 종류는 지오텍스타일/합성수지 차수막과 벤토나이트의 결합방식에 따라 보강 GCL과 비보강 GCL로 구분됨.
- ✓ 벤토나이트는 GCL의 투수특성에 중요한 영향을 미치며 토목섬유는 구조적 특성에 영향을 미침.

#### - 혼합 차수재

- ✓ 혼합 차수재는 차수재로서 사용되려는 주재료가 차수재질기준을 만족하지 못하고 양이 충분하지 못한 경우에 사용됨.
- ✓ 혼합 차수재의 종류는 사용하는 재료에 따라 흙-벤토나이트, 흙-시멘트, 일반시멘트 콘크리트, 황산염 콘크리트, 플라이애쉬-시멘트/석회/벤토나이트 등으로 분류됨.

#### 흙·벤토나이트

- ✓ 흙·벤토나이트 혼합 차수재는 채취한 자연토의 투수계수가 규정치보다 클 경우에 자연토에 벤토나이트를 혼합한 것임.
- ✓ 여기서 벤토나이트가 투수저감 효과가 크기 때문에 벤토나이트를 첨가함.
- ✓ 벤토나이트의 혼합비는 채취된 자연토의 토질특성에 따라 차수조건에 만족하는 첨가량을 산정해야함(Sharma 외, 1988).
- ✓ 벤토나이트 함량이 증가할수록 일축압축강도 및 인장강도는 증가하며 전단강도는 영향을 거의 받지 않음(김강일 외, 2010).
- ✓ 흙·벤토나이트 층을 완성한 후에는 차수층 위에 차수재를 보호하기 위한 토층을 30~60 cm 정도 설치함.

#### 흙·시멘트

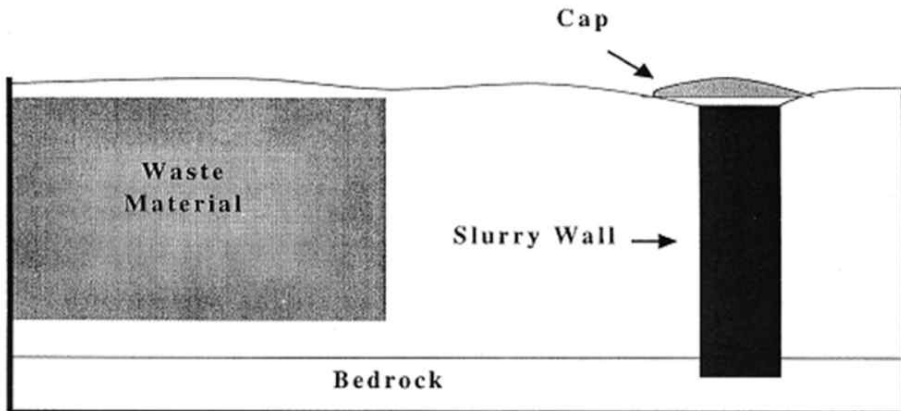
- ✓ 흙·시멘트 차수재는 자연토에 시멘트를 혼합한 재료로 자연토보다 투수계수가 작고 강도가 크며 침식에 대한 저항성이 큰 시멘트를 사용함.
- ✓ 시멘트의 첨가량은 흙의 입도분포에 의해 결정되며 일반적으로 시멘트의 첨가량이 증가할수록 재령기간이 길수록 압축강도는 증가함(김수문 외, 2000).
- ✓ 흙시멘트 차수재는 양생이나 운영중에 균열이나 건조수축이 발생되기 쉽고 10-7 cm/sec이하의 투수계수를 얻기가 어려운점이 있음.

#### • 수직차수재

##### - Slurry wall

- ✓ Slurry wall은 침출수 유출 및 지하수의 침투를 방지하기 위해 매립장 주변에 시공하는 트랜치에 벤토나이트 슬러리를 공급하면서 원하는 깊이(보통 불투수층)까지 수직으로 굴착한 후 뒷채움재를 충전하여 벽체를 시공하는 방법으로 30 m까지의 깊이에 0.6~1.2 m의 두께로 시공함.
- ✓ 이 방법은 일반적으로 capping과 연계하여 부지가 큰 경우나 긴급히 오염물의 차

단이 필요한 경우에 적용됨.



<그림 66> Slurry wall의 개요

**- Sheet pile**

- ✓ Sheet pile은 강널말뚝기술이라고 하며 강철로 된 철판형태의 pile을 연결하여 불투수층까지 막아 차수기능을 갖게 하는 기술임.
- ✓ Sheet pile은 시공시 땅자갈 섞인 지반에서는 항타작업이 어려운 점이 있으며 시공이 쉽고 단기간내에 설치가 가능하나 조기 불투성이 미흡하고 다소 고가임.
- ✓ 국내에서는 난지도 매립장 정비공사에 적용된 바 있음.

### 3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

#### 3-1. 목표

- 연구기간 내 연구개발 성과 목표
  - ✓ 특허출원 2건
  - ✓ 학술발표 3건
  - ✓ 인력양성 1건
  - ✓ 기타 1건
  - ✓ 고용창출 2건(추가달성)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표								
	지식 재산권			기술 실시 (이전)		사업화					기술 인증	학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍 보		기타 (타 연구 활용 등)
	특 허 출 원	특 허 등 록	품 종 등 록	건 수	기술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출	투 자 유 치		논문		학 술 발 표			정 책 활 용	홍 보 전 시	
												SC I	비 SC I						
단위	건	건	건	건	백 만 원	백 만 원	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	명	건	건	건		
가중치	40												15		10			35	
최종목표	2	2		1	7	2	840		1				3		1			1	
1차연도	목표												1						
	실적												1						
2차연도	목표	2											2		1			1	
	실적	2						2					2		2			1	
소계	목표	2											3		1			1	
	실적	2						2					3		2			1	
종료 1차연도				1	7	1	160												
종료 2차연도		1				1	170		1										
종료 3차연도		1					170												
종료 4차연도							170												
종료 5차연도							170												
소계		2		1	7	2	840		1										
합계	2	2		1	7	2	840		3				3		2			1	

○ 기타( 안전한 매몰용 저장조 세부기준 : 1건)

### 3-2. 목표 달성여부

#### 1) 특허출원 2건

- 폐사축 매몰탱크(10-2019-0169939)
- 폐사가축 매몰지 구조(10-2019-0169940)

#### 2) 학술발표 3건

- 한국토양비료학회에서 학술발표 (우리나라 가축매몰지 환경오염 현황 조사, 2018. 10. 25.)
- SUITMA10 학술발표(Development of Mixed Liner to Prevent Leakage from Carcass Burials, 2019. 6. 17)
- 국제학술대회(ESAFS2019)에서 매몰지 연구 발표(Potential Substitutes for Quicklime (CaO) as Disinfectant for Carcass Burial Sites, 2019. 11. 5.)

#### 3) 인력양성 1건

- 참여연구원 석사 졸업(2019. 8. 22)
- 참여연구원 석사 졸업예정(2020. 2 월 중)

#### 4) 기타 1건

- 매몰용 저장조 규격 안(농림식품부 협의)

#### 5) 추가달성 2건

- 신규고용 2명

### 3-3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- ✓ 목표 미달성 없음

## 4. 연구결과의 활용 계획 등

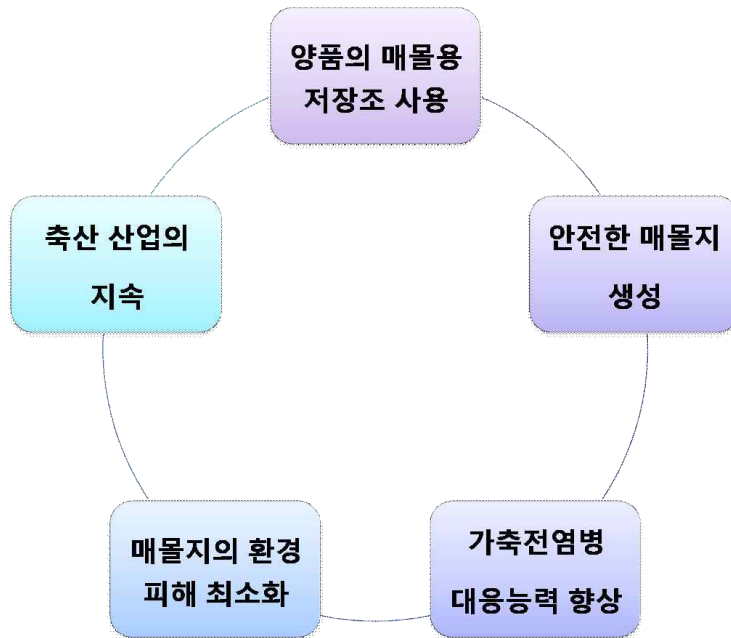
- ✓ 가축매몰지는 가축질병 확산을 방지하기 위한 살처분에서 발생된 대량사축을 처분하기 위하여 조성되는데, 침출수 누출로 인한 지하수 오염에 대한 우려가 높음.
- ✓ 본 연구의 목적은 가축매몰지로 인한 오염을 저감하기 위해 가축매몰지 조성방법을 개선하기 위해 하부 차수재의 특성을 평가하며 개선안을 제안하고자 함.
- ✓ 매몰사축의 조기안정화를 위한 기술적 접근방법으로 조기안정화와 현지안정화를 고려할 수 있음.
- ✓ 조기안정화는 호기성 미생물을 활용하여 사체 분해를 촉진시키며 현지안정화의 경우 차수재, 차수벽의 설치 등으로 오염확산을 방지함.
- ✓ SOP상 매몰지에 사용되는 비닐 차수재의 경우 두께 0.2mm 이상으로 제한하고 있으나 폭이 3.6 m로 좁아 겹침이음이 발생함.
- ✓ 두께 0.15 mm 비닐의 경우 폭이 넓으며 강도가 두께 0.2 mm 비닐과 큰 차이가 없어 사용이 가능함.
- ✓ HDPE 차수재의 경우 열울착이 가능한 두께 1.5mm 이상으로 설치하여야함.
- ✓ 매몰지 차수를 위해 하부 바닥에 벤토나이트와 토양을 혼합하여 기본 차수재를 만들고 그 위에 차수재를 설치하여 시공하는 것이 안전하다 판단됨.
- ✓ 소독을 위해 생석회 사용 시 발열로 인한 차수재 손상이 야기되므로 차수재와 가축사체 사이의 소독구간에는 대체 소독제인 소석회 사용을 권장 함.
- ✓ 매몰용 저장조를 규격화하여 사용하여 매몰용 저장조의 안전성 확보가 가능함.
- ✓ 가축전염병 발생시 오염물질 유출이 적은 매몰지를 생성하는데 활용이 가능함.

### ○ 활용분야

- ✓ 침출가축 매몰지 조성
- ✓ 폐기물 매립지 조성

### ○ 기대효과

- ✓ 매몰용 저장조의 규격화 및 안전한 매몰지 생성 정책자료로 활용 가능
- ✓ 적합한 양품의 매몰용 저장조로 매몰지 생성
- ✓ 안전한 매몰지 생성으로 환경오염 최소화
- ✓ 매몰지 생성기술의 발전으로 가축전염병의 대응능력 향상
- ✓ 가축전염병 피해 최소화로 지속적인 축산산업 지속 가능



<그림 67>농업인 또는 소비자 측면의 기대효과

○ 인력양성 측면

- ✓ 신기술 개발로 친환경 건설 구조물 분야의 인재 양성
- ✓ 연구개발 과정에서 획득한 각종 자료를 교육자료로 활용
- ✓ 연구 개발된 결과를 학술대회에 발표하여 과학기술 학문 수준 향상에 기여
- ✓ 일반 매물지 및 대체 매물지 조성에 필요한 숙달된 인력 확충 필요

○ 환경적 측면

- ✓ 엄격해지는 환경 규제에 대처하여 매물지 생성 유지관리 가능
- ✓ 매물지로 인한 환경오염 최소화로 농촌환경 개선
- ✓ 침출수 유출방지로 인해 농촌 생태환경 보호
- ✓ 지역주민 및 관광객등 국민의 삶의 질 향상

○ 기술, 경제·산업 측면

- ✓ 토사계 혼합 차수재를 이용한 가축 매물지 침출수 유출 방지로 생태환경 개선
- ✓ 현장에서 간편하게 시공 가능한 가축 매물지 건설 공법 마련
- ✓ 내구성이 강한 차수재 대체재로 안전한 가축 매물지 구축
- ✓ 침출수 누출을 방지할 수 있는 가축 매물지 방재책 수립에 기여
- ✓ 침출수 누출 대책 수립으로 주민들의 만족도 제고
- ✓ 환경오염물질 확산제어로 추후 정화비용 절감



○ 추가연구의 필요성

- ✓ 본 연구에서는 매몰용 저장조의 재질 기준을 제시하였으나 매몰용 저장조를 절단하여 실험실내에서의 검사방법임.
- ✓ 가축전염병 발생 시 긴급하게 생산된 매몰용 저장조를 현장에서 실험하는 방법이 없어 현장에서 검사가 가능한 검사방법 및 기준에 관한 연구가 필요함.

## 참고문헌

- Boardman D. I. Glendinning S., Roger C. D. F., (2001), “Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes” , *Geotechnique*, Vol.50, No.6. pp. 533~543
- IOS, (2011), “Soil quality — Guidance for burial of animal carcasses to prevent epidemics”
- KONETIC, (2006), “불량매립지 조기안정화 기술”
- Paluszak. Z., Bauza-Kaszewska. J., (2011), “ Inactivation of indicator bacteria in animal by-product sanitised by CaO” , *Bulletin- Veterinary institute in pulawy*, Vol.55 No.4, pp. 699~704
- Roger C. D. F. Glendinning S., Troughton V. M., (2000), “The use of additives to enhance the performance of lime piles” , *Proceedings GIGS 2000*, Helsinki, Finland, pp. 127-134.
- Schotsmans E.M., Denton J., Dekeirsschieter J., Ivaneanu T., (2012), “Effects of hydrated lime and quicklime on the decay of buried human remains using pig cadavers as human body analogues” , *Forensic Science International*, Vol.217, No.1-3, pp 50~59
- Sharma. H. D. Kozicki. P., (1988), “The Use of Synthetic Liner and/or Soil-Bentonite Liner for Groundwater Protection” , *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, pp. 1149~1156
- 김건하, (2017), “매몰지 사후관리 평가기술 및 안정성 확보기술 개발” , 환경부
- 김광일, 임은상, 김기영, 신동훈, (2010), “Soil-Bentonite 혼합토의 강도 및 투수 특성” , *한국지반환경공학외 논문집 제11권, 제4호*, pp. 5~12
- 김미영, 김건하, (2013), “전과정평가를 활용한 가축매몰지의 환경영향 분석” , *한국물환경학회지*, 제29권, 제2호, pp. 239~246
- 김수문, 염희남, 임남웅, (2000), “벤토나이트와 시멘트가 매립장 차수층의 투수성과 압축강도에 미치는 영향 (1)” , *대한환경공학회지*, 제22권, 제3호, pp. 495 ~ 504
- 노진환 유재영 최우진, (2001), “국내산 벤토나이트에 대한 응용광물학적 특성 평가 ( I ) : 광물 조성 및 특징과 양이온 교환특성과의 연계성” , *韓國鑛物學會誌*, 제15권 제4호, pp. 329~344
- 농림축산식품부, (2018), “구제역 긴급행동지침”
- 박정용, 안영희, (2014), “포화층 토양미생물에 의한 하천수의 nitrate 제거 실험실규모 컬럼 실험” , (2014), “포화층 토양미생물에 의한 하천수의 nitrate 제거 실험실규모 컬럼 실험” , *생명과학회지*, 제24권, 제5호, pp. 543 ~ 548
- 벽산엔지니어링(주), (2017), “토양·지하수 오염방지 기술개발사업” , 환경부
- 서울시립대학교, (2008), “가축 매몰에 따른 환경오염관리방안 마련” , 환경부
- 우용호, (2006), “활성탄에 의한 PCBs의 흡착제거” , *한국안전학회지*, 제21권, 제1호, pp. 59~64

이남훈, 김재명, 전한용, 강호정, (2005), “폐기물매립공학”, 동화기술  
이상덕, (2011), “기본 토질시험 : 원리와 방법”, 새론  
(주)다산컨설턴트, “오염물질 처리 체계 개선을 고려한 안전한 순환형 매몰지 조성기술 개발”,  
환경부  
환경부, (2010), “가축매몰지역 환경관리지침”  
환경부, (2017), “수질오염시험기준”  
환경부, (2018), “폐기물관리법”