

오염물질 배출시설 주변지역 과거 환경영향 기록복원 기초연구

기후변화대응연구센터



오염물질 배출시설 주변지역
과거 환경영향 기록복원 기초연구

2019. 09

Contents

- 목차 i
- 표 목차 v
- 그림 목차 vii
- 연구 내용 요약 X
- 1장 서론 3**
 - 1. 연구 배경 및 필요성 3
 - 2. 연구 범위 5
 - 3. 연구내용 및 방법 6
 - 1.1 연구내용 6
 - 1.2 연구방법 6
 - 1.3 정책의 활용방안 6
- 2장 송산 방조제 주변 환경영향 변화 특성 10**
 - 1. 송산 방조제 주변 환경 변화 10
 - 2. 송산 방조제 주변 토양오염 현황 12
 - 3. 송산 방조제 주변 오염영향 및 관리체계의 문제점 15
- 3장 오염원의 기원 및 연대 추정 방법 18**
 - 1. 납의 일반적 특성 18
 - 1.1 납의 물성 및 주요 납 광물 18
 - 1.2 납의 용도 19
 - 1.3 납의 독성 19
 - 2. 납 동위원소 분류 및 조성 특성 21
 - 3. 납 동위원소를 활용한 납의 기원 및 연대 추정 23

- 1.1 납 동위원소를 이용한 오염원 기원 식별 23
- 1.2 방사능 납 동위원소를 이용한 납 연대 추정 24
- 4. 국내 납 동위원소 연구 동향 25
- 4장 송산 방조제 현장조사 29**
 - 1. 조사개요 29
 - 1.1 공간적 범위 29
 - 1.2 시간적 범위 29
 - 1.3 내용적 범위 29
 - 2. 현장조사 및 분석방법 31
 - 1.1 현장조사 방법 31
 - 1.2 전처리 및 분석 방법 31
 - 3. 분석 결과 34
 - 1.1 ^{210}Pb 을 이용한 퇴적을 산정 및 연대 추정 34
 - 1.2 안정 납(Pb) 동위원소 분석 결과 37
 - 1.3 중금속 분포 특성 45
- 5장 과거 환경영향 기록복원 51**
 - 1. 환경오염 분쟁지역에서의 오염영향 판별절차 및 평가 51
 - 1.1 판별 방법 평가 51
 - 2. 송산 방조제 과거 환경영향 기록복원 평가 52
- 6장 결론 및 정책제언 56**
 - 1. 결론 56
 - 2. 정책제언 58
- 참고문헌 60**

표목차

[표 2-1] 당진시 특정 토양오염관리 대상시설 현황	12
[표 2-2] 당진시 산업단지 현황	13
[표 2-3] 당진시 오염토양 조사지점의 분석결과 및 토양오염도 기준	15
[표 3-1] 주요 납 광물 비교	19
[표 3-2] 국내 안정 동위원소 연구동향	25
[표 4-1] 송산 방조제 퇴적물 조사 정점 좌표	29
[표 4-2] 퇴적물 표준시료(MESS-4)를 이용한 분석결과 및 회수율	32
[표 4-3] Pb 동위원소 표준시료를 이용한 분석결과 및 회수율	33
[표 4-4] 주상퇴적물 내 ^{210}Pb 방사능 분석결과	34
[표 4-5] 주상 퇴적물의 연대추정 결과	35
[표 4-6] 주상 퇴적물 내 중금속 분석 결과	38
[표 4-7] 대기 분진 시료의 납 동위원소 분석 결과	39
[표 4-8] 잠재적인 오염원의 기여율 추정	43
[표 4-9] 주상퇴적물 내 중금속 분석 결과	45
[표 4-10] 주상퇴적물 내 용출 중금속량/총 중금속량 비	47
[표 5-1] 기존 판별 방법과 본 연구 방법의 비교	52

그림목차

[그림 2-1] 송산방조제 주변환경 변화 위성 사진(구글지도)	11
[그림 2-2] 당진시 산업 및 농공단지 현황	12
[그림 2-3] 당진시 토양오염 현장조사 및 지점 현황	14
[그림 3-1] 납 동위원소의 성장곡선	22
[그림 3-2] 납 광석의 주요 산출국의 동위원소 비 비교	23
[그림 4-1] 송산 방조제 현장조사 정점도	30
[그림 4-2] 주상퇴적물 채취 장면(좌)과 채취된 주상 퇴적물(우)	31
[그림 4-3] 깊이별 ^{210}Pb 의 분포 특성	36
[그림 4-4] ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb 의 방사붕괴 모식도	38
[그림 4-5] $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 과 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 의 분포	39
[그림 4-6] 잠재적 유입 물질과 주상 퇴적물의 안정 납 동위원소 비교	41
[그림 4-7] 잠재 오염원의 기여율 비교	44
[그림 4-8] 주상 퇴적물 내 중금속의 용출 및 잔류 부분 수직분포	46
[그림 4-9] 깊이별 용출 중금속량/ 총 중금속량 비	48
[그림 5-1] 과거 환경영향 복원 평가를 위한 오염원 판별 절차	51

정책지원과제(기후변화) 2018-04
오염물질 배출시설 주변지역
과거 환경영향 기록복원 기초연구



연구요약

- 과거에 오염되었거나 또는 현재 오염배출시설에 의해 오염되고 있는 지역의 환경문제에 따른 환경 분쟁을 해소하기 위한 효율적인 관리와 평가 방법이 과학적으로 수행될 수 있는 정책마련이 필요함
- 그럼에도 불구하고 지금까지 오염물질 배출시설과 인근 주거지역에서의 오염물질 오염문제를 일반 행정 담당자의 경험적인 판단에 의하거나 한정적이고 단편적인 조사·측정 결과에만 기초해 환경 분쟁을 해결해 왔기 때문에 효율적으로 환경 분쟁에 대처하기 어려운 문제점을 안고 있었음
- 따라서, 본 연구에서는 오염배출시설 주변지역 환경매체 내 오염을 평가·해석하기 위한 추적자로서 납 동위원소의 활용 가능성 확인과 과거 환경영향 기록복원 방안을 마련하고자 함
- 이러한 오염배출시설 주변에 위치한 송산방조제 내 퇴적물에 있어서 오염물질 오염특성과 현황 및 안정 동위원소 분석을 통해 과거 및 현재 오염에 특성에 대한 통합적인 관리방안을 도출하고자 함
- 송산 방조제 내 퇴적물을 코어를 이용해 주상 퇴적물을 채취(약 60cm)하고 각 깊이별(0~1cm, 15~16cm, 30~31cm, 45~46cm, 60~61cm) 그 오염원 특성을 파악하기 위해 중금속 농도와 안정 납 동위원소 비를 활용하였음
- 그 결과 송산 방조제는 연간 약 0.64cm/yr 정도 퇴적되고 있는 것으로 파악되었으며 안정 납 동위원소 비는 크게 3 그룹으로 나뉠 수 있었음
 - 0~1cm(2019년), 15~16cm(2009년), 30cm 이하(1999년 이하)
- 이 3그룹 퇴적물에 대한 잠재적인 오염원이 미치는 영향을 분석한 결과 자연적인 오염원으로 충남 납 광산 기원(41.8~51.7 %)이 가장 높은 기여율을 보였음.

- 이외에 인위적인 오염원으로 페루 납 광산 기원(28.1~34.0 %), 석탄분진(6.0~10.0 %), 철 분진(4.8~8.0 %), 슬래그 시멘트(4.6~7.7 %) 순으로 기여율이 높게 나타났음. 즉 전체적으로 인위적인 납 기원은 48.3~58.2%임
- 따라서 자연적인 납 기원(41.8~51.7 %)보다 인위적인 납 기원(48.3~58.2%)이 높은 기여를 하고 있는 것으로 추정됨
- 즉, 송산 방조제 내 퇴적물에는 깊이에 따라 다소 차이를 보이지만 자연적 기원의 납과 외부에서 유입된 인위적인 납이 혼합된 특성을 보여주고 있음
- 한편 중금속 농도 분석에서도 비슷한 경향을 보이고 있음. 즉, 저층에서 표층으로 갈수록 중금속 농도가 증가하거나 또는 비슷한 값을 보여주고 있음
- 이처럼 오염물질 유입에 의해 송산 방조제 퇴적물 내 오염물질 농도가 높아지는 것은 결국 주변 환경(산업 및 공업시설의 증가)의 변화에 의한 것으로 추정됨
- 송산 방조제 주변 환경 변화를 인공 사진으로 그 변화를 살펴보면, 송산 방조제가 준공된 1982년 이후부터 1990년대까지는 농업 이외에는 산업시설이 없었지만 1992년도 현대 당진 제철 부지를 조성하고 일부 산업시설이 들어섰고 2009년도에서 2019년까지는 산업시설들이 꾸준히 증가해오고 있는 것을 알 수 있음(그림 2-1)
- 이처럼 1982년 완공되어 약 37년 동안 보조 수원으로 활용되고 있는 송산 방조제 내 퇴적물은 긴 시간동안 주변 오염원에 노출되어 왔고 그 영향은 그대로 퇴적물 오염특성에 영향을 미치고 있을 것으로 추정됨
- 특히, 송산 방조제와 약 50~100m 떨어진 장소에 2010년쯤 당진 현대제철소와 관련된 산업시설이 주변에 건설되고 운영되면서 그 오염영향이 크게 기여했다고 추정됨
- 왜냐하면 2009년에서 2019년 사이 퇴적물 중 석탄 분진, 철 분진, 슬래그 시멘트 기원 오염원의 비율이 높아졌음. 이는 주변 산업시설에서 배출되는 오염원인 물질이 송산 방조제 퇴적물에 유입되어 쌓인 결과라고 추정됨

제 1 장

서론

1. 연구 배경 및 필요성
2. 연구 범위
3. 연구 내용 및 방법

제 1 장

서론



1. 연구 배경 및 목적

- 오염배출 시설에 따른 오염이 발생했거나 또는 현재 발생되고 있는 환경문제에 대해 육체적·정신적 피해 배상에 대한 분쟁이 다각적으로 발생하고 있음
- 특히, 산업지역 및 공단 주변에 가까운 주거지역 등에서는 환경오염 발생과 관련된 민원은 지속적으로 제기되고 있으나 현재 그에 맞는 과학적인 조사 방법 및 관리 시스템은 미흡한 실정임
- 이처럼 오염배출시설에서 배출된 오염물질은 주변 환경에 침강 또는 퇴적되어 긴 시간동안 주변 환경에 악영향을 끼치는 경우가 많이 보고되고 있고, 이러한 물질들은 대부분 환경 중에서 잔류성이 강하고 분해가 어려운 물질들이 많이 포함되어 있음
- 국내의 경우 제철산업을 비롯한 그와 관련된 산업 시설은 대단히 중요한 기반산업 활동의 한 영역이며 핵심적인 산업생산 분야로 중추적인 역할을 해오고 있음
- 하지만 이러한 오염배출시설 인접지역에 농경지 및 주거단지가 형성되어 있어 오염배출시설로부터 배출되는 다양한 오염물질에 노출되어 있는 실정임
- 특히 중금속을 포함하는 오염물질들이 대기 및 다양한 경로를 통해 인근 지역으로 이동하여 주변 환경 및 생태계를 오염시킬 가능성이 제기되고 있음
- 그럼에도 불구하고 지금까지 오염물질 배출시설과 오염물질에 의한 환경 및 생태계 오염문제를 환경행정 담당자의 경험적인 판단에 의하거나 매우 한정적이고 단편적인 측정결과에만 기초해 왔기 때문에 효율적으로 환경

- 분쟁에 대처하기 어려운 문제점을 안고 있었음
- 따라서 과거에 오염물질에 의해 오염되었거나 현재 오염배출 시설에 의해 주변 환경 및 주거지역의 오염 가능성이 높은 지역 등의 환경 분쟁을 해소하기 위한 효율적인 관리와 평가 방법이 과학적으로 수행되어야 할 것으로 사료됨
- 선진국 및 국내에서도 오염물질에 의한 주변 환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 동위원소를 활용해 오염물질(중금속 등) 영향에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있음
- 이러한 연구는 오염물질의 기원과 연대를 추정하는 것으로 과거 진행되었거나 현재 진행되고 있는 오염현상에 대해 현황을 알 수 있는 과학적인 근거 자료를 얻을 수 있음
- 동위원소를 가지는 중금속 종류가 많지는 않지만 그 중에서 4종류 동위원소(^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb)를 가지는 납이 다른 중금속과 더불어 납 오염원 또는 오염원의 기원 등 특정 지역의 오염현상을 밝히는 주요 방법으로 활용되고 있음
- 또한, 방사능 납 동위원소(^{210}Pb)을 활용해 토양 및 퇴적물에서의 퇴적속도 및 연대측정에 많이 이용되고 있음
- 따라서, 본 연구에서는 오염배출시설 주변지역 환경매체 내 오염을 평가·해석하기 위한 추적자로서 납 동위원소의 활용 가능성 확인과 과거 환경영향 기록복원 방안을 마련하고자 함



2. 연구 범위

- 시간적 범위 : 2019년 6월~9월(4개월)
- 공간적 범위 : 충청남도 당진시 송산 방조제 인근
- 내용적 범위 :
 - 송산 방조제 주변 환경 및 오염 현황 특성 조사
 - 납 동위원소를 활용한 오염원의 기원 및 연대 추정 방법 제안
 - 송산 방조제 현장조사를 통한 오염 현황 및 특성 평가
 - 송산 방조제 과거 환경영향 기록복원



3. 연구 내용 및 방법

1.1 연구 내용

- 과거에 오염되었거나 또는 현재 오염배출시설에 의해 오염되고 있는 지역의 환경문제에 따른 환경 분쟁을 해소하기 위한 효율적인 관리와 평가 방법이 과학적으로 수행될 수 있는 정책마련이 필요함
- 그럼에도 불구하고 지금까지 오염물질 배출시설과 인근 주거지역에서의 오염물질 오염문제를 일반 행정 담당자의 경험적인 판단에 의하거나 한정적이고 단편적인 조사·측정 결과에만 기초해 환경 분쟁을 해결해 왔기 때문에 효율적으로 환경 분쟁에 대처하기 어려운 문제점을 안고 있었음
- 따라서 본 연구에서는 오염배출시설 주변지역 환경매체 내 오염을 평가·해석하기 위한 추적자로서 납 동위원소의 활용 가능성을 검토하였고, 과거 환경영향 기록복원 방안을 마련하고자 함
- 이를 위하여 오염배출시설 주변에 위치한 송산방조제 퇴적물 내 오염물질 오염특성과 현황 및 안정 동위원소를 분석을 통해 과거 및 현재 오염에 특성에 대해 검토하였음

1.2 연구 방법

- 송산방조제 주변 환경 및 토양 오염현황 조사
 - 송산방조제 주변 환경 변화와 현재 토양 오염변화 검토
- 오염원의 기원 및 연대 추정 방법
 - 안정 납 동위원소를 활용한 오염원의 기원 및 연대추정
 - 국내 안정동위원소 연구 동향 비교
- 송산방조제 현장 조사를 통한 오염특성 및 현황 파악
 - 중금속 농도 및 존재 형태별 특성 변화
 - 안정 납 동위원소를 활용한 오염원의 기원 및 기여율 추정
- 과거 환경영향 기록복원 방안 마련

1.3 정책의 활용방안

- 잠재적 환경위해시설 환경영향 평가 정책으로 활용
- 관련 실과 효율적인 정책운영 기초자료로 활용

제 2 장

송산 방조제 주변 환경영향 변화
특성

1. 송산 방조제 주변 환경 변화
2. 송산 방조제 주변 토양 오염현황

송산 방조제 주변 환경영향 변화 특성



1. 송산 방조제 주변 환경 변화

- 송산 방조제는 1977년 12월에 착공해서 1982년에 준공하였고 면적은 45,131m²이며, 총저수량은 7,458 천톤으로 보조수원으로 이용되고 있음
- 송산 방조제의 연년별 주변 환경 변화를 인공위성 사진으로 나타냈음(그림 2-1)
- 송산 방조제 주변 환경 변화를 보면 1984년도부터 1990년도까지는 방조제 주변에는 농지가 전부였고 인위적인 건축물은 보이지 않음
- 하지만 1990년 이후 현대 당진 제철소 부지를 확보하기 위해 간척지 조성 사업을 시작하였으며 1999년도에는 조성된 간척지에 일부 산업시설들이 자리잡기 시작한 것을 알 수 있음
- 또한 현대 당진 제철소(동곡리, 가곡리) 옆 고대리, 한지리와 부곡리에도 산업단지를 위한 부지 조성이 이루어지고 있음
- 2009년도 위성 사진에는 당진 제철소 부지 확대와 산업 시설들이 지속적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있음
 - 현대 당진 제철소 2010년 준공 후 본격적으로 시설 가동이 됨
- 2019년도 현재는 송산 방조제 주변에 많은 산업시설들이 들어서 있고 현재에도 부지를 확대하면서 그 영역을 넓히고 있는 것을 알 수 있음
- 이처럼 송산 방조제가 준공된 1982년 이후부터 1990년대까지는 농업 이외에는 산업시설이 없었지만 1992년도 현대 당진 제철 부지를 조성하고 일부 산업시설이 들어섰고 2009년도에서 2019년까지는 산업시설들이 꾸준히 증가해오고 있는 것을 알 수 있음



[그림 2-1] 송산 방조제 주변 환경 변화 위성사진(구글지도)

2. 송산 방조제 주변 토양 오염현황

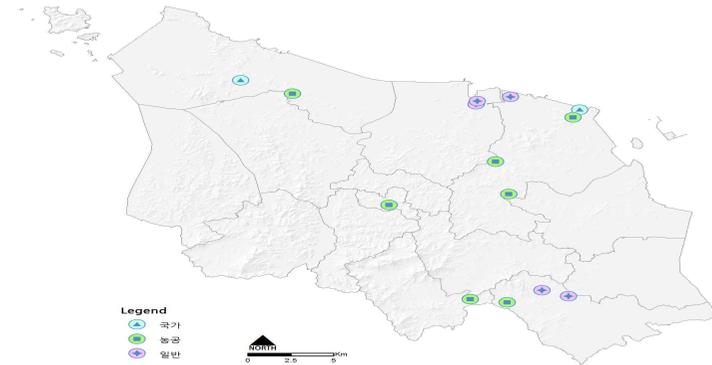
- 당진시의 2015년 기준 특정토양오염관리대상시설은 주유소 115개소, 산업 시설 31개소, 유독물 1개소로 총 147개소가 신고됨(충청남도의 7.7% 차지)

[표 2-1] 당진시 특정토양오염관리대상시설 현황

연도	신고 업소 수	석유류(개소)			유독물	
		소계	주유소	산업시설 기타 (난방시설 등)		
2015년	147	146	115	31	-	1

자료 : 당진시 환경보전종합계획(2016-2020년)

- 당진시의 국가산업단지는 석문국가산업단지(고대지구, 부곡지구) 2개소가 입지하고 있음
- 일반산업단지는 5개소가 있으며 이 중 4개소는 조성 중에 있음. 농공단지는 총 7개소가 가동 중에 있음



[그림 2-2] 당진시 산업 및 농공단지 현황

[표 2-2] 당진시 산업단지 현황

구분	단지명	위치	지정면적 (천m ²)	가동업체수 (개소)
국가 산업 단지	석문	석문면 삼봉리, 고대면 성산리	12,018	10
	아산 국가 부곡	송악읍 고대리·한지리·복운리	3,038	8
			3,119	92
일반 산업 단지	당진1철강	송악읍 고대리 321	2,014	4
	송산2	송산면 가곡리·동곡리·유곡리, 송악읍 고대리 일원	5,608	1
	합덕	합덕읍 소소리·석우리	970	15
	합덕	합덕읍 소소리, 순성면 본리· 중방리 일원	636	-
	현대제철	송산면 동곡리·가곡리	5,564	1
	농공 단지	당진	당진읍 시곡리 81	85
면천	면천면 문봉리 894	135	8	
석문	석문면 통정리 1222	215	4	
송악	송악면 가학리 683	171	16	
신평	신평면 거산리 일원	138	8	
한진	송악면 한진리 416	143	2	
합덕	합덕읍 도곡리 106-19	106	19	

주: 가동업체가 2개 이하인 단지는 업체정보보호를 위하여 고용 정보를 비공개함

자료 : 당진시 환경보전종합계획(2016-2020년)

- 각 지자체 별로 토양오염우려지역 실태조사 및 오염토양 정확도를 통해 토양 환경을 보전하기 위해 “토양환경보전법” 제5조 제2항에 의거하여 토양오염실태조사를 실시함
- 당진시의 토양 오염도를 추가적으로 알아보기 위해 4개 지점에 대한 현장 측정을 실시한 결과 중 송산 방조제와 가까운 S-1지점의 결과를 나타냄(그림 2-3)
- 조사 지점(S-1)은 송산면 동곡리 송산산업단지 내 표층 토양을 채취해서 분석함
- 분석항목은 총 14개 항목으로 2015년 10월(1차)과 2016년 2월(2차)에 조사 및 측정을 실시함
- 토양오염도 분석 결과 “3 지역”에 해당하는 S-1(공단지역) 지점은 카드뮴, 납, 이연 항목이 토양오염 우려기준 (“1지역”)을 초과하였음(표2-3)

- S-1지점의 경우 오염이 확인되어 오염확산의 방지를 위해 토양정밀조사가 필요할 것으로 판단됨
- 토양오염 우려기준은 사람의 건강·재산이나 동물·식물의 생육에 지장을 초래할 우려가 있는 토양오염의 기준을 말함
- 토양오염 대책기준은 토양오염 우려기준을 초과하여 사람의 건강 및 재산과 동물·식물의 생육에 지장을 주어서 토양오염에 대한 대책을 필요로 하는 토양오염의 기준을 말함



[그림 2-3] 당진시 토양오염 현장조사 지점 현황

[표 2-3] 당진시 오염토양 조사지점의 분석 결과 및 토양오염도 기준

물질	S-1		우려기준			대책기준		
	1차	2차	1지역	2지역	3지역	1지역	2지역	3지역
카드뮴	5.11	5.14	4	10	60	12	30	180
구리	33.3	30.25	150	500	2,000	450	1,500	6,000
비소	3.72	3.70	25	50	200	75	150	600
수은	불검출	불검출	4	10	20	12	30	60
납	232.2	241.05	200	400	700	600	1,200	2,100
6가크롬	0.5	0.55	5	15	40	15	45	120
아연	492.4	452.04	300	600	2,000	900	1,800	5,000
니켈	28.8	26.75	100	200	500	300	600	1,500
불소	불검출	불검출	400	400	800	800	800	2,000
벤젠	불검출	불검출	1	1	3	3	3	9
톨루엔	불검출	불검출	20	20	60	60	60	180
에틸벤젠	불검출	불검출	50	50	340	150	150	1,020
크실렌	불검출	불검출	15	15	45	45	45	135
TPH	불검출	불검출	500	800	2,000	2,000	2,000	6,000
TCE	불검출	불검출	8	8	40	24	24	120
PCE	불검출	불검출	4	4	25	12	12	75
pH	6.67	6.70	-	-	-	-	-	-

주 : 토양오염도 우려기준 및 대책기준
 TPH : 석유계총탄화수소, TCE : 트리클로로에틸렌, PCE : 테트라클로로에틸렌
 자료 : 당진시 환경보전종합계획(2016-2020년)

3. 송산 방조제 주변 오염 영향 및 관리체계의 문제점

- 송산 방조제 주변 오염배출 시설(현대제철 등) 증대에 따른 잠재적인 토양 오염 및 현재 진행되고 있는 것으로 추정됨
- 표 2-3의 S-1지점인 경우 공단지역 주변 토양으로 정밀조사가 필요한 정도의 토양오염 현황을 보여주고 있음
- 반면 토양오염 시설 지역의 경우 실태조사는 잘 이루어지지 않아 기초데이터가 부족하고 이러한 이유로 체계적인 관리 및 대책 정책이 미흡함

3 장

오염원의 기원 및 연대 추정 방법

1. 납의 일반적 특성
2. 납 동위원소 분류 및 조성 특성
3. 납 동위원소를 활용한 오염원의 기원 및 연대 추정
4. 국내 납 안정동위원소 연구 동향

오염원의 기원 및 연대 추정 방법



1. 납의 일반적 특성

1.1 납의 물성 및 주요 납 광물

- 납(Pb)은 중금속의 일종으로 원자번호 82, 원자량 207.2이며, 녹는점 327.5℃, 끓는점 1,740℃, 비중은 11.34이고 철에 비해 1.4배 무거움
- 납의 새로운 절단면은 연회색으로 금속광택이 있지만 공기 중에 노출 되면 흑회색으로 변하며 광택을 잃어버림
- 납을 포함한 광물은 500종류 이상이 알려지고 있지만 대부분은 광산지대 등 한정된 장소에서 출토되고 있음
- 표 3-1에 주요 납 광물을 표시하였음. 가장 보편적이고 자원적으로도 중요한 광물은 방연석(方鉛鉱)이고, 그 외 4종류는 방연석이 지표부근의 환경하에서 산화해서 생긴 일반적인 2차 광물임
- 방연석은 납 회색으로 금속광택이 있는 육면체 또는 팔면체 결정으로 생산되며 비중은 7.5~7.6임

[표 3-1] 주요 납 광물 비교

광물명	영어명	화학식	납 함유량(%)
방연석	galena	PbS	87
수백연석	hydrocerussite	Pb ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	80
백연석	cerussite	PbCO ₃	78
녹연석	pyromorphite	Pb ₅ (PO ₄) ₃ Cl	76
황산염석	anglesite	PbSO ₄	68

1.2 납의 용도

- 인류가 처음으로 납을 사용한 것은 지금으로부터 5천 년 전으로 기원전 3천 년 경에는 이미 이집트에서는 청색도기의 유약 등 다방면으로 납이 사용되어왔다고 함
- 현재 납의 주요 용도는 자동차 등에 사용되고 있는 배터리 전극임
- 그 외에 무기약품, 전선 케이블 피복재, 납유리, 총탄, 전자재료, 납시용품(봉돌), 방음재료, 방사선 시트 등에도 사용되고 있음

1.3 납의 독성

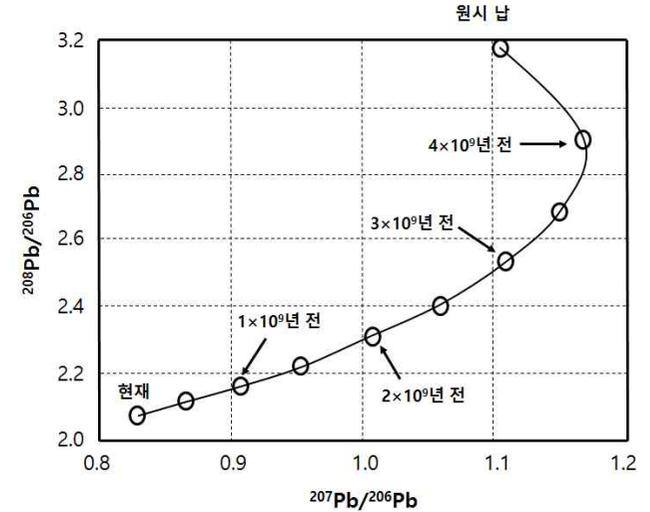
- 납은 카드뮴, 수은과 함께 미량이라도 생물은 필요하지 않은 원소이며 생물에게는 독성만을 가지는 금속임
- 납은 인체에 축적성이 있기 때문에 소화관으로부터 흡수율이 높고 가장 감응성이 높은 유아의 대사연구에 기초해 1일 허용섭취량(TDI)이 체중 1kg 당 0.0035mg으로 산출되어 수도수질기본과 수질환경기준이 설정되고 있음
- 고농도의 납에 의한 중독 상태는 식욕부진, 빈혈, 오줌량 감소, 배 및 발 근육의 허약 등이 있음
- 16개월간 암 발생에 관한 동물실험에서는 신장에 양성종양 및 암 발생이 보고되고 있음

- 특정의 무기 납 화합물에 대해서는 실험동에 있어서 암 발생을 증명하는 충분한 증거가 많이 있기 때문에 국제 암 연구기관(IARC)는 무기 납 화합물을 그룹2A(인간에 대해서 필시 암 발생이 있음)로 분류하고 있음
- 한편, 금속 납 및 유기 납 화합물에 대해서는 암 발생보고가 불충분하기 때문에 금속 납을 그룹2B(인간에 대해서 암 발생이 있을지도 모름), 유기 납 화합물을 그룹3(인간에 대한 암 발생에 대해서는 분류할 수 없음)으로 분류하고 있음
- 단, 유기 납 화합물은 인간과 동물의 체내에 부분적으로 납 이온으로 대사되고 있기 때문에 무기 납 화합물에 따른 독성을 발현한다고 생각할 수 있음
- 인간이 납을 체내로 흡수할 가능성이 있는 것은 주로 물이나 음식에 의한 것으로 생각할 수 있고, 체내에 흡수된 납은 혈액 중에 분포하고 있다가 90% 이상이 뼈에 쌓이게 됨
- 주로 뇨(오줌)에 포함되어 배출되지만 체내의 농도가 반으로 되는 것은 약 5년이 걸리며, 길게 체내에 잔류함



2. 납 동위원소 분류 및 조성 특성

- 납에는 ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb 4종류의 안정동위원소가 있음
- ^{206}Pb 은 원래 질량수 238의 우라늄(^{238}U)으로 이 우라늄이 반감기 45억 년에서 붕괴해서 생성된 것임
- 똑같이 ^{207}Pb 은 ^{235}U 가 반감기 7억년에서, 또 ^{208}Pb 은 ^{232}Th (토리움)가 반감기 141억년에서 붕괴해서 생성된 것임
- 우라늄(U)과 토리움(Th)은 암석과 토양 중에 미량원소로 존재하기 때문에 수억 년이라는 긴 지질시간을 보내며, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb 의 양은 각각의 붕괴속도에 따라서 증가하고 있음
- 한편, 납은 1개의 ^{204}Pb 은 최초의 납이어서 첨가되는 것이 없기 때문에 일정 양을 가지고 유지하고 있음
- 따라서 시간에 대한 정보를 얻고 싶은 경우에는 ^{204}Pb 을 기준으로 비($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)을 얻는 것이 기본임
- 그러나 각각의 동위원소의 특징을 추출하기 위해서는 2개의 동위원소 비($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)로 표현하는 방법이 편리하고, 일반적으로 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 을 가로축에, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 을 세로축으로 한 그래프가 많음
- 이렇게 하면 가로축은 시간으로, 세로축은 Th/U비에 관련한 지표가 됨
- 즉, 자연방사성 핵붕괴에 의한 납이 형성되는 양은 공존하는 우라늄, 토리움의 양에 의존함
- 지구형성시대의 암석 중 납(원시 납)에 시간과 함께 우라늄, 토리움의 자연방사성 핵붕괴에 의한 납의 동위체가 첨가되는 것에 의해 납의 동위체비의 연대변화는 이론적으로 구할 수 있고 이를 이용해서 광석과 암석의 지질연대정보를 얻는 것이 가능함(그림 3-1)
- 긴 시간동안 우라늄과 토리움과 공존해서 영향을 지속적으로 받은 납광물일수록 그림 3-1의 성장곡선의 좌측 아래쪽에 납 동위원소비를 나타냄



[그림 3-1] 납 동위원소의 성장곡선

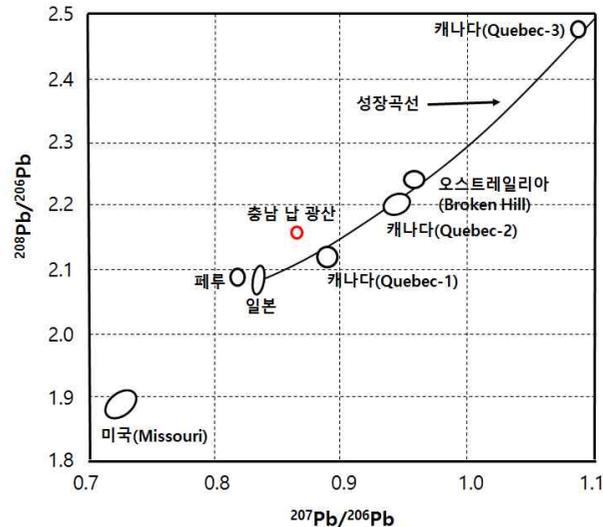
- 납 동위원소분석에서는 표면전리형질량분석기(Thermal Ionization Mass Spectrometer: TIMS)을 이용해서 4종류의 동위원소 전부의 비를 측정하지만 이 장치는 일부 대학이나 국가연구기관에 한정됨
- 한편, ICP질량분석계는 TIMS에 비해서 정밀도가 낮고, 특히 ^{204}Pb 측정에는 그 존재도가 낮기 때문에 기술상의 곤란함을 동반함
- 그러나 두개의 납 동위원소비($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)의 측정은 표준 물질을 사용하면서 진행하면 보다 높은 정밀도와 많은 샘플 분석이 가능함
- 납인 경우 동위원소(^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb) 상호간의 질량차가 적기 때문에 질량동위체효과가 생기기 어렵고, 동위체 분별은 무시 가능함
- 예를들어, 석탄 중의 납 동위체비는 그것을 연소한 소각로의 하부에 떨어진 탄분 중의 납 동위체비와 차가 없음
- 따라서 납광석이 갖는 산지 특성의 동위체 조성은 그것을 제련해 만들어진 금속 납 또는 합성 납화합물중에도 마치 “납의 지문” 처럼 보존되고 있음



3. 납 동위원소를 활용한 오염원의 기원 및 연대 추정

1.1 납 동위원소를 이용한 오염원 기원 식별

- 납이 광산으로부터 떨어져 나올 경우 더 이상 우라늄과 토리움에 의한 방사성 핵붕괴가 진행되지 않고 납 동위원소 비도 고정됨
- 그렇기 때문에 광산의 납은 그 형성과정과 시대에 의해서 다른 동위원소 비를 나타냄. 이러한 납의 동위원소비가 다르다는 것을 이용해 환경 중에 방출된 납의 기원과 요인을 평가함
- 예를들어, 충청남도의 납 동위원소 비는 외국산 납 동위원소비와 다른 값



[그림 3-2] 납 광석의 주요 산출국의 동위원소 비 비교(Hiroa 등의 자료를 인용해서 재작성함을 가지고 있음(그림 3-2))

- 납 동위원소비를 활용한 환경에 있어 납 기원을 추정하는 시험은 미국 로스앤젤레스의 가솔린 및 에어로졸 중 납에 대해서 Chow and Johnstone이 1965년에 행한 연구가 처음이라고 일컬어지고 있음

- 그 후 이 방법은 납의 기원을 명확하게 구분해 주는 것으로 유효한 수단으로서 세계 각지에서 연구가 진행되고 있음
- 일본에서도 1976년에 처음으로 농수산물 산지분석을 위해 납 동위원소 분석을 하였으며 이후 대기, 토양, 수질 등 다양한 환경문제에서 응용되고 있음
- 여기서 말하는 환경문제란 대기와 강우, 토양 등에 포함되어 있는 미량의 납 유래를 명확하게 설명하는 것임
- 그 원리는 앞서 얘기했듯이 납 제품에 포함되어 있는 납광석의 산지(납광산이 생성된 지질시대 및 장소)에 의해서 납 동위원소 조성이 다르다는 것에 주목했기 때문에 대상물 중의 납 동위원소 조성을 알면 그것이 국내의 자연유래의 것인가 아니면 외국의 오래 전 지질시대의 외래 납광석인가를 알 수 있음
- 물론, 자연유래 납(국내 광석)과 인위적 오염된 납(외국 광석)의 혼합한 것이 존재하지만 예를들어 해저퇴적물에 있어서 심층별로 측정해보면 일부 층에서 인위적 납 오염이 시작되고 이 납이 어떠한 과정을 거쳐 축적되었는가를 추정하는 것이 가능함

1.2 방사능 납 동위원소를 이용한 납 연대 추정

- 한편, 방사성 동위원소인 ^{210}Pb 은 반감기가 22.2년이어서 현재 해저퇴적물 또는 호소퇴적물의 연대측정에 많이 이용되고 있음
- 특히 최근(약 100~150년 정도)의 퇴적물 동태를 설명하기 위해서 ^{210}Pb 연대 추정 방법이 널리 이용되고 있음
- 그리고 ^{210}Pb 연대 추정 방법은 CIC(Costant Initial Concentration)모델과 CRS(Constant rate of Supply) 모델을 이용하여 계산함
- 자세한 납 연대 측정 방법은 제4장에서 서술하고 있음



4. 국내 납 동위원소 연구 동향

- 토양 또는 퇴적물 내 오염원 판별을 위한 동위원소 분석, 지화학적 분석, 광물학적 분석방법은 현재 대학, 국립환경과학원 또는 기타 연구기관 등에서 주로 기초연구지만, 환경 분쟁증가와 이로 인한 오염원 인자, 오염 원인비 등을 규명하기 위한 신뢰성 있는 과학적 조사방법이 요구됨(표 3-2)
- 특히 토양은 오염발생과 발견 간 시차 및 공간구성이 달라 유해 오염원을 판별 또는 추적하는 기술이 특히 요구됨
- 아직은 동위원소에 대한 분석방법에 대한 내용이 많고 실제적으로 적용한 사례들은 상대적으로 미미함. 하지만 최근 실제 적용 사례들이 소개되고 있음

[표 3-2] 국내 안정동위원소 연구 동향

연구제목	연도	연구기관	연구성과
다검출 유도결합 플라즈마 질량 분석기를 이용한 신속하고 정확한 Pb동위원소 분석	2001	한국기초과학 지원연구원	기존 TIMS 분석방법과 MC-ICP/MS 분석방법을 비교하였고, 그 결과 유사한 정밀도를 얻음
주암댐 호저 퇴적물에서의 수직적 중금속 분산과 210Pb를 이용한 퇴적속도 산정	2005	한국지질자원연구원	주암댐 퇴적물 오염상태 및 연평균 퇴적 높이 산정
경북 영천지역 지하수의 지구화학 및 환경동위원소 연구	2007	한국원자력연구원	지하수화학에 영향을 줄 수 있는 다양한 요소들에 대한 검토를 위해 연구지역이 유형별 자연수를 시기별, 심도별로 채수하고, 이들에 대한 수리·화학적

연구제목	연도	연구기관	연구성과
한강수계의 수리지구화학 및 동위원소 지구화학	2008	한국기초과학 지원연구원	분석 한강 하천수 화학적 조성 및 동위원소 분석, 기반암과의 영향 관계 조사
IRMS를 이용한 환경오염물질의 안정동위원소 분석기법 연구	2012	국립환경과학원	황안정 동위원소값의 정확도 및 정밀도 향상
안정동위원소를 이용한 유기오염물질 오염원 추적연구	2012		헥사클로로벤젠(HCB)을 대상으로 한 환경 내 안정동위원소(탄소) 비교 및 오염원 추적연구
유해중금속 안정동위원소의 분석 정밀/정확도 향상연구(I)	2012		납과 카드뮴 안전동위원소 비측정에 요구되는 정밀/정확도 확립 및 가이드라인을 확보
납 동위원소를 이용한 안동호 퇴적물 중의 납 오염기원 연구	2012	국립환경과학원	유역토양, 광미퇴적물, 아연제련시설 부산물 중의 납 동위원소 분석 및 국내외 비교
안정동위원소를 이용한 환경 오염원 추적 연구기반 구축(II)	2015		다양한 환경에서의 환경오염 현안문제를 해결하는데 활용 가능하며, 환경오염원 추적 연구를 위한 기초 기반 자료 이용

제 4 장

송산 방조제 현장조사

1. 조사 개요
2. 현장조사 및 분석 방법
3. 분석 결과

제 4 장

송산 방조제 현장조사



1. 조사개요

1.1 공간적 범위

- 충청남도 당진시 송악읍 고대리 주변 송산 방조제(표 4-1, 그림 4-1)

1.2 시간적 범위

- 2019년 7월 16일

1.3 내용적 범위

- 송산 방조제의 과거 오염 영향을 평가하기 위해 주상퇴적물을 채취
- 연대 측정에 따른 중금속의 농도를 용출/잔류 부분을 구분하여 분석
- 중금속 기원을 추정하기 위해 안정 납 동위원소 분석
- 주상퇴적물의 퇴적속도 및 연대 측정을 위해 ²¹⁰Pb 분석

[표 4-1] 송산 방조제 퇴적물 조사 정점 좌표

지역	위도	경도
송산 방조제	36° 58' 38.49"N	126° 73' 8.49"E



[그림 4-1] 송산 방조제 현장조사 정점도



2. 현장조사 및 분석 방법

1.1 현장조사 방법

- 중소형선박을 이용하여 저수지 중앙부분으로 접근하였으며, 중력 시추기(Gravity core sampler)로 수직 60cm 이상의 깊이를 보전하여 주상퇴적물을 채취하였음(그림 4-2)
- 주상퇴적물은 냉장 보관하여 실험실로 이동하였으며, 실험실에서 시료를 1cm 간격으로 구분하여 채취하였고 그 중 일부를 분석에 이용하였음



[그림 4-2] 주상퇴적물 채취 장면(좌)과 채취된 주상퇴적물(우)

1.2 전처리 및 분석 방법

- 시료의 전처리 및 분석은 해양환경공정시험기준(해양수산부, 2018)에 따라 수행하였음

1.2.1 중금속 농도 분석

1) 용출 부분 중금속

- 용출 부분 중금속 분석을 위해 동결건조 후 약산(1M HCl)을 이용하여 24시

간 용출 후 원심 분리한 상등액을 1% 질산(HNO₃, suprapure 등급)으로 적정 농도로 희석 후 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS : iCAP RQ, Thermo Fisher Scientific)로 분석하였음

2) 잔류 부분 중금속

- 용출 부분 중금속을 분석하고 남은 잔류 중금속은 혼합산(HF + HNO₃ + HClO₄)을 이용하여 완전 분해하였으며, 여기에 1% 질산(HNO₃)으로 적정 농도로 희석 후 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS : iCAP RQ, Thermo Fisher Scientific)로 분석하였음

3) 중금속 회수율

- 중금속 분석 자료의 정확도를 검증하기 위해 캐나다 NRC의 퇴적물 표준물질인 MESS-3을 시료와 같이 처리 하며 <표 4-2>에 제시하였음
- 중금속의 총 농도는 용출 부분(용출성 중금속량)과 잔류 부분(잔류성 중금속량)의 합의로 표시하여 제시하였음

[표 4-2] 퇴적물 표준시료(MESS-4)를 이용한 분석 결과 및 회수율

(건중량, Mean±sd, n=3)

분석 항목	Cr	Ni	Co	Cu	Zn	Cd	Pb	Li
	(mg/kg)							
함유 농도	94.3 ±1.8	42.8 ±1.6	13.0 ±0.8	32.9 ±1.8	147 ±6	0.28 ±0.04	21.5 ±1.2	65.3 ±6.8
용출	12.4	20.2	8.2	20.7	90.7	0.22	16.8	14.5
잔류	83.2	20.8	4.8	13.5	58.3	0.09	6.1	54.8
총농도	95.6	40.9	13.0	34.2	149.0	0.31	22.9	69.2
회수율 (%)	101	96	100	104	101	111	106	106

1.2.2 납(Pb) 안정 동위원소 분석

- 용출 중금속 시료에서 납 안정 동위원소를 분석하였으며, 납 동위원소의 비율($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 와 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)은 질량변이 보정을 위하여 용출한 시료에 미국 표준연구소 TI 표준물질(NIST997)을 5 ng/ml가 되게끔 첨가한 후에 한국 기초과학연구원 연구원의 다검출기 유도결합 플라즈마 질량분석기(MC-ICP-MS; Multi-Collectors Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer; Neptune, ThermoFinnigan Ltd., UK)로 측정하였음
- 납 안정 동위원소 자료의 정확도는 미국 표준 기술 연구소(NIST: national Institute of standards and technology)의 NBS981을 분석하여 <표 4-3>에 제시하였음

[표 4-3] Pb 동위원소 표준시료(NBS981)를 이용한 분석 결과 및 회수율
(Mean±sd, n=3)

분석 항목	$^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
인증값	0.059042±0.00037	0.91464±0.00033	2.1681±0.0008
분석값	0.058825±0.00001	0.91333±0.00058	2.1637±0.0006
회수율(%)	99.6%	99.9	99.8%

1.2.3 ^{210}Pb 을 이용한 퇴적물 산정

- ^{210}Pb 의 방사능은 한국기초과학연구원의 알파선 분석기(Canberra Inc., USA)를 사용하여 분석하였음

$$^{210}\text{Pb}_{\text{total}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{excess}} + ^{210}\text{Pb}_{\text{background}} \text{-----}(3.1)$$

- 알파 분광기를 이용하여 측정된 ^{210}Pb 의 방사능량은 대기나 해수로부터 공급된 과잉(excess) ^{210}Pb 뿐만 아니라 퇴적물 내의 기저(Background) ^{210}Pb 도 포함되어 있다(식 3.1)
- 따라서 총 ^{210}Pb 에서 기저 ^{210}Pb 를 빼주어야 함. 기저 ^{210}Pb 은 ^{210}Pb 의 수직적인 분포에서 일정하게 유지 되는 값을 이용하였음



3. 분석 결과

3.1 ^{210}Pb 을 이용한 퇴적물 산정 및 연대추정

- 퇴적물 추정 모델은 1차원 2상자 모델을 이용하였으며 퇴적물 혼합작용은 표층 상자에서만 발생하고, ^{210}Pb 의 공급과 퇴적속도가 구분 가능한 기간 동안 일정하였다는 정상상태 가정에 기초를 두고 다음 식 3.2에 의해 구하였음

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{-----} 3.2$$

- 여기서 A는 각 깊이에서의 ^{210}Pb 의 방사능, A_0 는 표층에서의 ^{210}Pb 의 방사능을 의미하며, λ 는 ^{210}Pb 의 붕괴상수로 0.0311 yr⁻¹이다. t는 시간을 의미함. 식 3.2에 S=z/t를 대입하면 다음과 같이 변환됨

$$A = A_0 \cdot e^{(\lambda/S)z} \text{-----} 3.3$$

- 여기서 S는 퇴적속도이며, z는 퇴적층 표층에서부터 각 층의 깊이를 나타냄. 퇴적속도는 식3.3의 양변에 자연로그를 취하고, ln(A)와 깊이 z와의 회귀식에서 기울기 m= -λ/S로부터 구할 수 있음

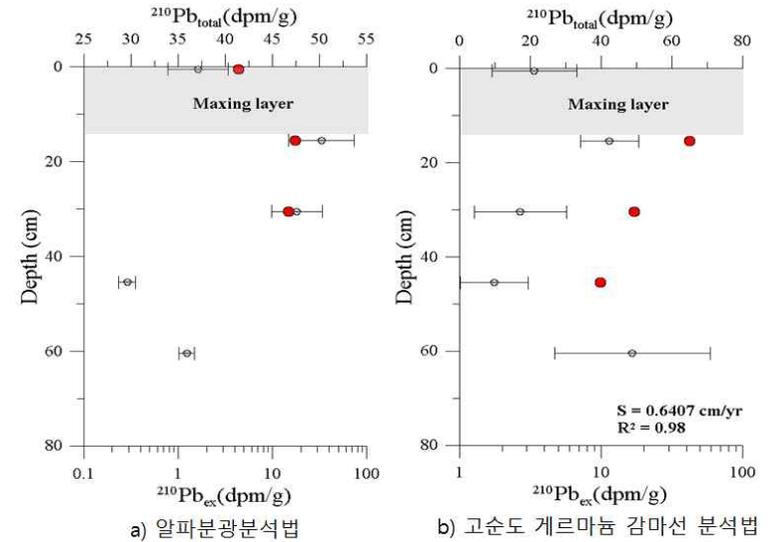
[표 4-4] 주상퇴적물 내 ^{210}Pb 방사능 분석 결과

깊이 (cm)	알파선분광분석법	고순도 게르마늄 감마선 검출기	
	^{210}Pb (mBq/g)	^{210}Pb	^{226}Ra
		(mBq/g)	
0~1	37.1 ± 2.2	47.0 ± 12.0	25.9 ± 2.8
15~16	50.2 ± 3.0	68.6 ± 8.2	26.2 ± 2.1
30~31	47.6 ± 2.9	41.0 ± 13.0	23.8 ± 2.8
45~46	29.6 ± 1.9	34.2 ± 9.6	24.3 ± 2.4
60~61	35.9 ± 2.3	73.0 ± 22.0	24.2 ± 5.1

- 알파분광분석법으로 측정된 ^{210}Pb 의 방사능량은 대기나 해수로부터 공급된 과잉(excess) ^{210}Pb 뿐만 아니라 퇴적물 내의 기저(Background) ^{210}Pb 도 포함되어 있다. 따라서 총 ^{210}Pb 에서 기저 ^{210}Pb 를 빼주어야 하며, 기저 ^{210}Pb 은 ^{210}Pb 의 수직적인 분포에서 일정하게 유지 되는 값을 이용하는 것이 일반적임(그림 4-3)
- 그러나 금회 분석 자료에서는 45~61cm 층에서 일정하게 유지되는 값이 제시되지 않아, 알파분광분석법을 이용한 퇴적물 산정은 불가능한 것으로 판단되었음
- 따라서 금회 퇴적물은 고순도 게르마늄 감마선 분석기(Well-type HPGe gamma detector, GCW3523, Canberra Inc, USA)를 이용하여 재분석 하였음
- 분석 방법은 시료를 측정 용기에 담고 밀폐시켜 ^{222}Rn 과 모핵종인 ^{226}Ra 과 방사 평형에 도달 할 수 있도록 20일 이상 보관 후 측정하였음
- 기저 ^{210}Pb 방사능이 ^{226}Ra 방사능과 연년 평형이라는 가정하에 총 ^{210}Pb 방사능과 ^{226}Ra 방사능 차이로 과잉 ^{210}Pb 방사능을 계산하였음
- 고순도 게르마늄 감마선 분석법으로 측정된 퇴적물은 0.6407cm/yr으로 나타났으며, 0~1cm, 15~16cm, 30~31cm 45~46cm, 60~61cm의 연대는 2019년, 2009년, 1999년, 1990년, 1980년으로 추정되었음(표 4-5)

[표 4-5] 주상퇴적물의 연대 추정 결과

구분	연대 추정
0~1cm	2019년
15~16cm	2009년
30~31cm	1999년
45~46cm	1990년
60~61cm	1980년

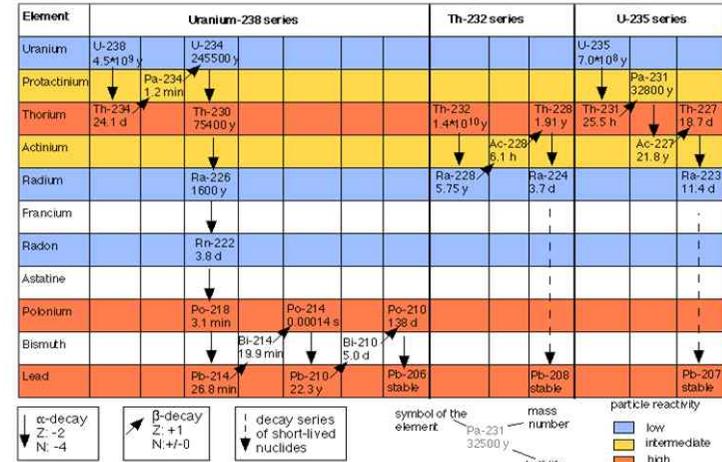


[그림 4-3] 깊이별 ^{210}Pb 의 분포 특성

1.2 안정 납(Pb) 동위원소 분석 결과

- Pb는 ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb 의 동위원소로 구성되어 있으며, 이 중 ^{204}Pb 만이 지구 생성부터 안정한 Pb이고 나머지 동위원소들은 각각 ^{238}U , ^{235}U 및 ^{232}Th 의 방사성 붕괴에 의하여 생성된 방사기원 동위원소 (radiogenic)임(그림 4-4)
- 일반적으로 납 광석 (예를 들면,방연석)에는 우라늄(U)이나 토륨(Th)이 거의 함유되어 있지 않아 방사 기원 납이 더 이상 생성되지 않으므로, 광석은 생성된 시기에서의 납 동위원소 비율을 현재에도 변함없이 유지함
- 반면에 주변 암석에서는 방사 기원 납이 계속 생성되므로 과거 어느 시기에 형성된 납 광산과는 다른 동위원소 비율을 보이고, 형성 시기와 모양의 Th/U 비율이 다른 광석사이에서도 서로 다른 동위원소 비율을 보임
- 따라서 이러한 광산 사이 및 광산과 주변 암석 사이의 동위원소 비율 차이와 환경에 배출된 후 이동 과정 및 속성과정 동안 이 비율이 변화하지 않기에 해양 환경에서 납 기원 및 근원지 추적 연구에 납 동위원소 비율이 사용됨

- 송산 방조제의 주상퇴적물 내 안정 납 동위원소 분석은 0~1cm(2019년), 15~16cm(2009년), 30~31cm(1999년), 45~46cm(1990년), 60~61cm(1980년) 총 5개 층에서 분석하였으며, 대기 분진 시료는 3회 반복하여 분석하였음
- 주상퇴적물 및 총부유입자물질(TSP) 시료의 안정 납 동위원소 분석 결과는 (표 4-6, 7)과 (그림 4-5)에 제시하였음
- 각각의 주상퇴적물 내 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 의 안정 납 동위원소 비는 좁은 범위에서 변화를 보였음
- 하지만 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 비의 관계로 살펴보면 주상 퇴적물은 크게 4 그룹으로 나뉠 수 있음(그림 4-5). 즉, 0~1cm(2019년), 15~16cm(2009년), 30~46cm(1999년, 1990년), 60~61cm(1980년)으로 구분됨
- 즉, 송산 방조제가 준공된 1980년대를 기준으로 보면 1980년대보다 1990년에서 1999년까지는 1980년대에 비해 Th 기원 동위원소(^{208}Pb)가 빈약했지만 2009년으로 갈수록 풍부해졌고 다시 2019년으로 갈수록 다시 빈약해지는 결과를 보였음
- 한편 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 비의 관계로 살펴보면 주상 퇴적물은 크게 3 그룹으로 나뉠 수 있음(그림 4-6). 즉, 0~1cm(2019년), 15~16cm(2009년), 30~60cm(1999년, 1990년, 1980년)으로 구분됨
- $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 비가 클수록 연령이 오래된 Pb 광산에서 기인한 Pb이 혼합되어 있을 가능성을 시사하고 있음
- 따라서 측정연대 2019년(0~1cm)에서 가장 오래된 납이 혼합되어 있고, 2009년(15~16cm) 층과 1999년(30~31cm) 이하의 층에서는 2019년도에 비해 비교적 최근의 생성된 납이 혼재해 있을 것으로 판단됨
- 이러한 결과로부터 송산 방조제 내 퇴적물은 크게 하층인 1999년 이전(30~60cm), 중층인 1999년(30~31cm)~2009년(15~16cm), 상층인 2009년(15~16cm)~2019년(0~1cm)로 구분되며 외부로부터 특성이 다른 물질이 유입되었음을 알 수 있음



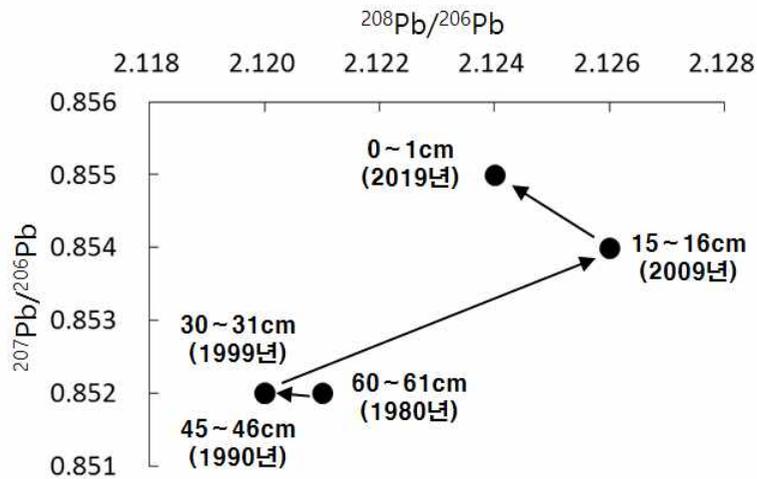
[그림 4-4] ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb 의 방사붕괴 모식도

[표 4-6] 주상퇴적물 내 중금속 분석 결과

깊이 (cm)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
0~1	18.289 ±0.006	15.645 ±0.006	38.839 ±0.015	2.124 ±0.000	0.855 ±0.000
15~16	18.320 ±0.005	15.650 ±0.004	38.953 ±0.012	2.126 ±0.000	0.854 ±0.000
30~31	18.359 ±0.005	15.648 ±0.004	38.925 ±0.011	2.120 ±0.000	0.852 ±0.000
45~46	18.369 ±0.008	15.655 ±0.007	38.939 ±0.019	2.120 ±0.000	0.852 ±0.000
60~61	18.369 ±0.006	15.658 ±0.006	38.952 ±0.014	2.121 ±0.000	0.852 ±0.000

[표 4-7] 대기 분진 시료의 납 동위원소 분석 결과

깊이 (cm)	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
A1	18.290 ±0.002	15.593 ±0.002	37.434 ±0.005	2.047 ±0.000	0.853 ±0.000
A2	18.292 ±0.001	15.594 ±0.001	37.438 ±0.003	2.047 ±0.000	0.852 ±0.000
A3	18.290 ±0.002	15.592 ±0.002	37.432 ±0.004	2.046 ±0.000	0.853 ±0.000
평균	18.291 ±0.001	15.593 ±0.001	37.435 ±0.003	2.047 ±0.000	0.853 ±0.000



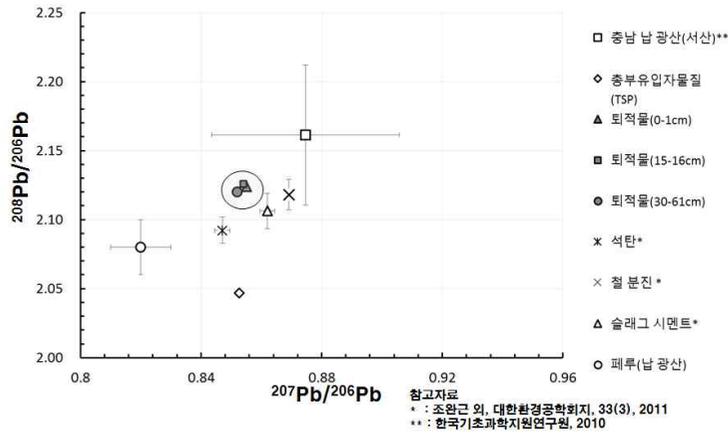
[그림 4-5] ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb와 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb의 분포

1.2.1 주상 퇴적물과 잠재적 오염원과의 관계 분석

- 일반적으로 방조제 및 저수지 내 오염물질은 주변 수역으로부터 유입되는 경우와 대기로부터 강하·침강되어 퇴적되는 경우로 나눌 수 있음
- 송산 방조제인 경우 수역 주변 농사와 관련된 유기물들이 유입될 가능성은

있지만 산업시설로부터 중금속과 같은 오염물질이 수계로 통해 유입될 가능성은 매우 낮음

- 따라서 송산 방조제인 경우 주변 오염배출시설로부터 배출된 다양한 입자성 오염물질(중금속류)이 대기를 통해 유입되는 경우가 큰 비율을 차지하고 있을 것으로 추정됨
- 주변 오염배출시설 중 가장 큰 비중을 차지하고 있을 가능성이 있는 현대제철은 배출시설로부터 대기로 다양한 입자성 오염물질을 내보내고 있고 이러한 물질은 송산 방조제 내 침강해 퇴적물에 퇴적 가능성이 높음
- 이러한 퇴적 가능성이 높은 잠재적 물질과 주상 퇴적물의 안정 납 동위원소를 그림 4-6에 나타내었음
- 잠재적 오염원들은 기존문헌과 조사를 통해 안정 납 동위원소 비를 나타내었음. 특히 총부유입자물질(TSP; Total Suspended Particles), 석탄 분진, 철 분진, 슬래그 시멘트, 폐류 납 광산 등은 외부로부터 유입된 인위적인 납으로 가정하였음
- 한편 충남 납 광산의 납은 천연적으로 생긴 자연적인 납 기원으로 가정하였음
- 이러한 잠재적인 오염원과 송산 방조제 주상퇴적물의 안정 납 동위원소 비값을 비교해 보면 주상퇴적물은 석탄 분진, 슬래그 시멘트, 철 분진과 가까운 값을 보이고 있는 것을 알 수 있음(그림 4-6)



[그림 4-6] 잠재적 유입 물질과 주상 퇴적물의 안정 납 동위원소 비 비교

1.2.2 잠재적 오염원의 기여도 추정

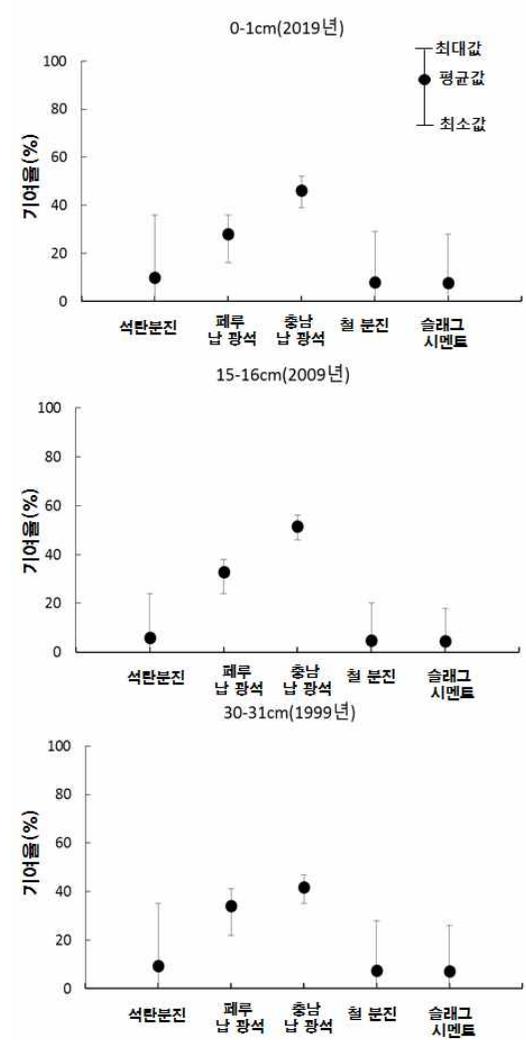
- 송산 방조제 내 잠재적 오염원의 기여율을 알아보기 위해 IsoSource Program 모델을 이용해서 그 기여 추정치를 추정하였음(표 4-8, 그림 4-7)
- 앞서 그림 4-6에서 나타내고 있듯이 주상퇴적물 내 유입되는 잠재적인 오염 물질 중 인위적인 오염물질로는 크게 석탄분진, 철 분진, 슬래그 시멘트, 그리고 페루 납 광산으로 볼 수 있으며 천연적인 납으로는 충남 납 광산으로 구분하여 평가하였음
- 그 결과 0~1cm(2019년) 퇴적물에서 석탄기원 0~36 %(평균 10 %), 페루 납 광석 기원 16~36 %(평균 28.1 %), 충남 납 광산 기원 39~52 %(평균 46.3 %), 철 분진 기원 0~29 %(평균 8 %), 슬래그 시멘트 기원 0~28 % (평균 7.7 %)로 추정되었음
- 15~16cm(2009년) 퇴적물에서 석탄기원 0~24 %(평균 6 %), 페루 납 광석 기원 24~38 %(평균 32.8 %), 충남 납 광산 기원 46~56 %(평균 51.7 %), 철 분진 기원 0~20 %(평균 4.8 %), 슬래그 시멘트 기원 0~18 %(평균 4.6 %)로 추정되었음
- 30~31cm(1999년) 퇴적물에서 석탄기원 0~35%(평균 9.4%), 페루 납 광석 기원 22~41 %(평균 34 %), 충남 납 광산 기원 35~47 %(평균 41.8 %), 철

분진 기원 0~28 %(평균 7.5 %), 슬래그 시멘트 기원 0~26 %(평균 7.2 %)로 추정되었음

- 자연적인 기원으로 충남 납 광산의 기여율은 깊이에 따라 다르지만 평균 41.8~51.7 %를 보여 자연적인 기원과 인위적인 기원이 혼합되어 퇴적되고 있는 것으로 추정됨
- 특히 연대 추정 값이 2009년을 나타내는 15~16cm 퇴적물과 2019년도를 나타내는 30~31cm 퇴적물 내 인위적인 오염 기원 중 석탄 분진, 철 분진, 슬래그 시멘트 등의 기여율이 증가하는 특성을 보였음
- 즉, 현대 당진 제철소가 준공(2010년)된 이후 제철소에서 많이 배출될 수 있는 석탄 분진, 철 분진, 슬래그 시멘트 기여율이 높아지고 있는 것을 알 수 있음
- 왜냐하면 2009년에서 2019년 사이 퇴적물 중 석탄 분진, 철 분진, 슬래그 시멘트 기원 오염원의 비율이 높아졌음. 이는 주변 산업시설에서 배출되는 오염원인 물질이 송산 방조제 퇴적물에 유입되어 쌓인 결과라고 추정됨

[표 4-8] 잠재적인 오염원의 기여율 추정

구 분		0~1cm (2019년)	15~16cm (2009년)	30~31cm (1999년)
평 균 (%)	석탄	10	6.0	9.4
	페루 남광산	28.1	32.8	34.0
	충남 남 광산	46.3	51.7	41.8
	철 분진	8.0	4.8	7.5
	슬래그 시멘트	7.7	4.6	7.2
최 소 (%)	석탄	0.0	0.0	0.0
	페루 남광산	16.0	24.0	22.0
	충남 남 광산	39.0	46.0	35.0
	철 분진	0.0	0.0	0.0
최 대 (%)	석탄	36.0	24.0	35.0
	페루 남광산	36.0	38.0	41.0
	충남 남 광산	52.0	56.0	47.0
	철 분진	29.0	20.0	28.0
	슬래그 시멘트	28.0	18.0	26.0



[그림 4-7] 잠재 오염원의 기여율 비교

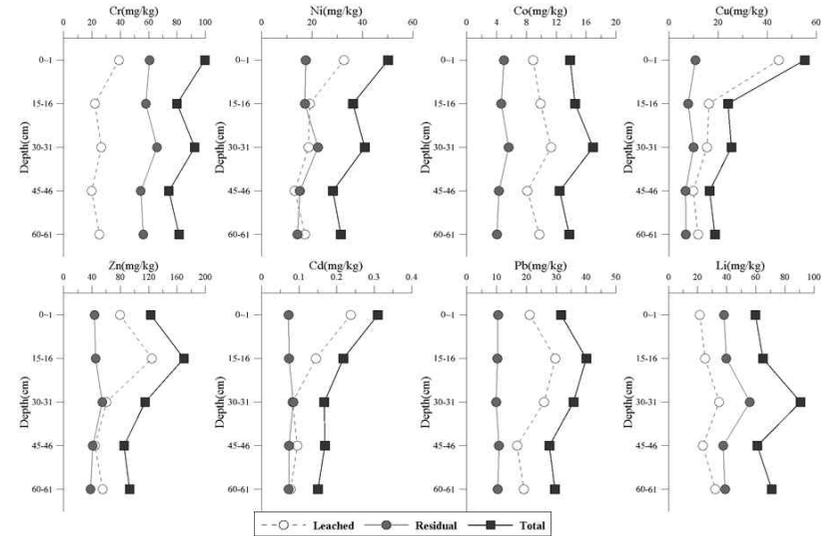
1.3 중금속 분포 특성

- 주상퇴적물 내 중금속은 분석은 0~1cm(2019년), 15~16cm(2009년), 30~31cm(1999년), 45~46cm(1990년), 60~61cm(1980년) 총 5개 층으로 구분해서 분석하였으며, 중금속 분석 방법에 따라 용출 부분과 잔류 부분으로 구분하여 제시하였음(표 4-9, 그림 4-8)
- 용출 부분 : 외부에서 유입되어 인위적으로 퇴적물에 흡착 또는 고정된 중금속으로 인위적인 오염 특성을 나타냄
- 잔류 부분 : 자연적으로 광석형태로 고정되어 있었던 중금속으로 자연적 특성을 나타냄
- 총 중금속 농도는 용출부분과 잔류부분을 합한 총 농도를 의미함
- 깊이별 총 중금속의 양은 기준 범위(표 4-9) 내에 속해 있으며 저층(60~61cm)에서 표층(0~1cm)으로 갈수록 증가하거나 또는 비슷한 값을 보여주고 있음
- 본 현장조사에서는 중금속 종류 중 코발트(Co), 구리(Cu), 아연(Zn), 카드뮴(Cd), 납(Pb) 등이 용출되는 중금속 양이 높게 나타나고 있음

[표 4-9] 주상퇴적물 내 중금속 분석 결과

구분	깊이 (cm)	Cr	Ni	Co	Cu	Zn	Cd	Pb	Li
		(mg/kg)							
용출부분	0~1	39.0	32.7	8.9	44.7	79.4	0.24	21.1	21.5
	15~16	22.1	19.1	9.9	16.2	124.6	0.14	29.7	25.1
	30~31	26.6	18.6	11.3	15.4	60.5	0.08	25.9	34.8
	45~46	19.8	13.1	8.1	9.8	44.1	0.10	16.8	23.5
	60~61	25.3	17.2	9.7	11.8	55.2	0.08	19.2	32.2
잔류부분	0~1	60.6	17.5	5.0	10.7	43.5	0.07	10.5	38.1
	15~16	58.0	17.1	4.6	7.8	45.1	0.07	10.3	39.7
	30~31	65.9	22.3	5.6	10.0	54.5	0.08	9.8	55.9
	45~46	54.5	15.2	4.3	6.7	41.2	0.07	10.8	37.5

구분	깊이 (cm)	Cr	Ni	Co	Cu	Zn	Cd	Pb	Li
		(mg/kg)							
	60~61	56.1	14.2	4.0	6.8	37.8	0.07	10.4	38.8
총 중금속 합계	0~1	99.6	50.2	13.9	55.4	122.9	0.31	31.6	59.7
	15~16	80.0	36.2	14.5	24.0	169.6	0.22	40.0	64.8
	30~31	92.5	40.9	16.9	25.4	114.9	0.17	35.8	90.7
	45~46	74.3	28.2	12.5	16.5	85.2	0.17	27.7	61.0
	60~61	81.4	31.4	13.7	18.6	93.0	0.15	29.5	71.0
기준		112	53	-	60	363	0.6	65	-



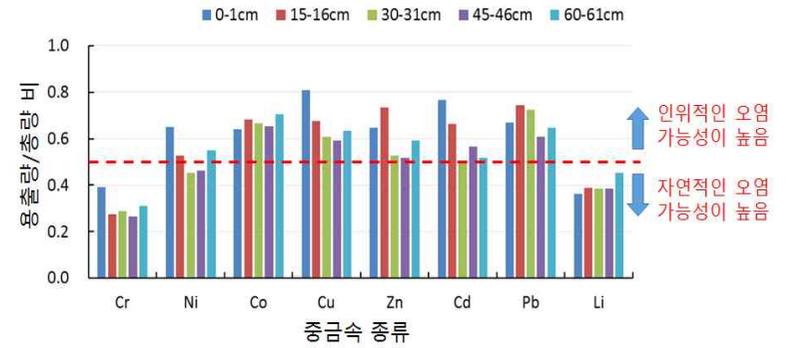
[그림 4-8] 주상퇴적물 내 중금속의 용출 및 잔류 부분 수직분포

- 퇴적물 내 중금속이 인위적으로 유입되었을 가능성을 알아보기 위해 총량에 대한 용출량 비를 표 4-10과 그림 4-9에 나타내었음
- 결과 값이 0.5 이상이 나오면 외부에서 유입된 인위적인 오염 중금속이 자연적인 오염원 보다 많이 포함되어 있음을 나타냄

- 이러한 결과로 보면 Ni, Co, Cu, Zn, Cd, Pb 등이 지속적으로 외부에서 유입되어 퇴적물에 쌓이고 있음을 알 수 있음
- 또한 하층(30cm 이하)보다 비교적 중층(15~16cm)과 표층(0~1cm)에서 인위적인 오염현상이 두드러지게 나타나고 있음
- 이러한 결과는 2009년 이후 송산 방조제 주변에 현대 제철소와 같은 산업시설이 크게 증가하면서 산업시설에서 배출되는 오염물질 그리고 그에 동반한 수송 장비 등 많은 인위적인 오염원이 생겨났고 그와 비례해서 오염물질 배출이 증가하였기 때문으로 추정됨

[표 4-10] 주상퇴적물 내 용출 중금속량/총 중금속량의 비

구 분	Cr	Ni	Co	Cu	Zn	Cd	Pb	Li
0~1cm (2019년)	0.39	0.65	0.64	0.81	0.65	0.77	0.67	0.36
15~16cm (2009년)	0.28	0.53	0.68	0.68	0.73	0.66	0.74	0.39
30~31cm (1999년)	0.29	0.45	0.67	0.61	0.53	0.50	0.72	0.38
45~46cm (1990년)	0.27	0.46	0.65	0.59	0.52	0.56	0.61	0.38
60~61cm (1980년)	0.31	0.55	0.71	0.63	0.59	0.52	0.65	0.45



[그림 4-9] 깊이별 용출 중금속량/총 중금속량 비

제 5 장

과거 환경영향 기록복원

1. 환경오염 분쟁지역에서의 오염영향 판별 절차 및 평가
2. 송산 방조제 과거 환경영향 기록 복원 평가

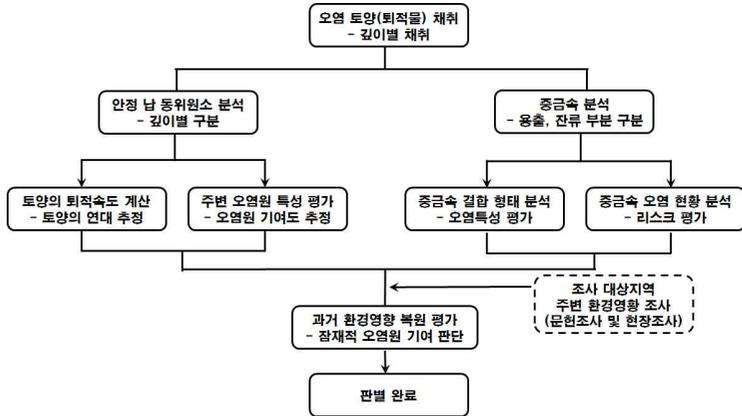
제 5 장

과거 환경영향 기록복원



1. 환경오염 분쟁지역에서의 오염영향 판별절차 및 평가

- 오염 토양층 VS 주변 환경영향 간 영향도 판별에 중점을 두어 오염원을 판별할때 판별절차를 도식화 하여 그림 5-1에 나타내었음



[그림 5-1] 과거 환경영향 복원 평가를 위한 오염원 판별 절차

1.1 판별 방법 평가

- 기존 오염농도 중심의 기술과 본 연구에서 제안한 기술의 비교 결과를 표 5-1에 나타내었음
- 본 연구에서는 기존 방법(기술)의 단점을 보완하고 결과의 신뢰성 및 판별 절차를 도출하고자, 오염원 특성 파악을 통한 오염토양 내 오염원

판별 방법을 서술하였음

[표 5-1] 기존 판별 방법과 본 연구 방법의 비교

비교 사항	기존 방법 (오염농도 기준 판별)	개발 방법 (동위원소분석과 오염농도 판별)
장점	- 큰 기술 없이도 조사 가능	- 오염원 인자별 기여율(%) 도출 가능 - 과거 오염현상에 대한 기록복원 가능 - 오염원 판별 체계 수립 가능
단점	- 과거 연구자료 수집 필요 - 오염농도 외에 정보 수집 어려움 - 조사기관마다 결과 상이함	- 전문적인 연구가 부족 - 판별기술의 난이도가 높고 다양한 분석 필요
개선사항		- 판별결과의 신뢰성 및 객관성 향상(기여율% 등) - 오염사례별 최적의 판별절차 도출

2. 송산 방조제 과거 환경영향 기록복원 평가

- 1982년 완공되어 약 37년 동안 보조 수원으로 활용되고 있는 송산 방조제 내 퇴적물은 긴 시간동안 주변 오염원에 노출되어 왔고 그 영향은 그대로 퇴적물 오염특성에 영향을 미치고 있을 것으로 추정됨
- 송산 방조제 내 퇴적물을 코어를 이용해 주상 퇴적물을 채취(약 60cm)하고 각 깊이별(0~1cm, 15~16cm, 30~31cm, 45~46cm, 60~61cm) 그 오염원 특성을 파악하기 위해 중금속 농도와 안정 납 동위원소 비를 활용하였음
- 그 결과 송산 방조제는 연간 약 0.64cm/yr 정도 퇴적되고 있는 것으로 파악되었으며 안정 납 동위원소 비는 크게 3 그룹으로 나눌 수 있었음
 - 0~1cm(2019년), 15~16cm(2009년), 30cm 이하(1999년 이하)
- 이 3그룹 퇴적물에 대한 잠재적인 오염원이 미치는 영향을 분석한 결과 자

- 연적인 오염원으로 충남 납 광산 기원(41.8~51.7 %)이 가장 높은 기여율을 보였음. 이외에 인위적인 오염원으로 페루 납 광산 기원(28.1~34.0 %), 석탄 분진(6.0~10.0 %), 철 분진(4.8~8.0 %), 슬래그 시멘트(4.6~7.7 %) 순으로 기여율이 높게 나타났음. 즉 전체적으로 인위적인 납 기원은 48.3~58.2%임
- 따라서 자연적인 납 기원(41.8~51.7 %)보다 인위적인 납 기원(48.3~58.2%)이 높은 기여를 하고 있는 것으로 추정됨
 - 즉, 송산 방조제 내 퇴적물에는 깊이에 따라 다소 차이를 보이지만 자연적 기원의 납과 외부에서 유입된 인위적인 납이 혼합된 특성을 보여주고 있음
 - 이러한 오염은 송산 방조제와 약 50~100m 떨어진 장소에 2010년쯤 당진 현대제철소와 관련된 산업시설이 주변에 건설되고 운영되면서 그 오염영향이 크게 기여했다고 추정됨
 - 특히, 2009년에서 2019년 사이 퇴적물 중 석탄 분진, 철 분진, 슬래그 시멘트 기원 오염원의 비율이 높아졌음. 이는 주변 산업시설에서 배출되는 오염원인 물질이 송산 방조제 퇴적물에 유입되어 쌓인 결과라고 추정됨



제 6 장

결론 및 정책제언

1. 결론
2. 정책제언

결론 및 정책제언



1. 결론

- 인공위성 사진에 따른 시대별 송산 방조제 주변 환경 변화를 살펴보면, 송산 방조제가 준공된 1982년 이후부터 1990년대까지는 농경지 이외에는 산업시설이 없었지만 1992년도 현대 당진 제철소 부지가 조성되면서 2019년까지 산업시설들이 꾸준히 확대되고 있는 것으로 나타남
- 이러한 산업단지 지역의 확대는 그 주변 토양 오염에 잠재적으로 오염을 증가시킬 수 있는 가능성을 높였고 2015년도에 조사된 정점(S-1) 결과에서도 이를 뒷받침하고 있음(표2-3)
- 한편, 송산 방조제 내 주상퇴적물의 동위원소와 중금속 농도를 활용해 그 오염특성을 조사하였음
- 그 결과 송산 방조제 내 퇴적물은 연간 약 0.64cm/yr 속도로 퇴적하고 있는 것으로 조사되었으며 깊이별 연대추정을 할 수 있었음
 - 0~1cm(2019년), 15~16cm(2009년), 30~31cm 이하(1999년), 45~46cm(1990년), 60~61cm 이하(1980년)
- 즉, 깊이 30cm 이하의 퇴적물은 1999년 이전에 퇴적한 것으로 주변 환경은 대부분 농경지로 인위적인 납 오염은 농업과 관련된 비료 및 축산 분뇨 등의 기원이 클 것으로 추정됨
- 반면 1999년 이후에는 주변에 산업시설이 조성되면서 산업시설에서 배출된 인위적인 오염물질들이 송산 방조제 내에 유입되어 퇴적 되었던 것으로 추정됨
- 이를 뒷받침하는 결과로 2009년 보다 2019년도에 퇴적물에서 석탄분지(4% ↑),

- 철분진(3.2%↑), 슬래그 시멘트(3.1%↑) 성분의 기여율이 더 높게 나왔음(표 4-8)
- 한편, 깊이별 중금속 농도를 분석한 결과에서도 많은 중금속(Ni, Co, Cu, Cd, Pb) 종류에서 저층(30cm 이하)보다 비교적 중층(15~16cm), 표층(0~1cm)에서 중금속 농도가 높게 검출되었음
 - 게다가 인위적 중금속 유입을 나타내는 용출부분이 자연적인 중금속을 나타내는 잔류부분보다 높게 검출되어 저층에서 표층으로 갈수록 외부에서 유입된 인위적인 중금속 오염이 증대되었다고 생각할 수 있음
 - 이러한 인위적인 오염 증대는 송산 방조제와 약 50~100m 떨어진 장소에 2010년쯤 당진 현대제철소와 관련된 산업시설이 주변에 건설되고 운영되면서 그 오염영향이 크게 기여했다고 추정됨
 - 따라서 본 연구에서 제안된 오염물질 오염특성과 현황 및 안정 동위원소 분석을 통해 과거 및 현재 환경오염분쟁에 대한 통합적인 관리방안을 마련하는데 매우 유효할 것으로 판단됨



2. 정책제언

2.1 정책 우선순위 설정을 위한 과학적인 토양관리 방안 마련

- 현재 토양오염 대상지역에 대한 실태조사와 토양오염방지 효과를 높이기 위해 관내 토양 오염원 인벤토리 구축이 필요함
- 이러한 현황 DB를 토대로 통합정보시스템 구축, 토양 통합관리계획 수립을 통하여 환경 분쟁 관련 정책 지원에 과학적 근거로 활용될 수 있음

2.2 토양오염실태 조사 개선 및 확대

- 오염원 종류가 다양해짐에 따라 기존 토양오염조사(농도 중심) 외에 중금속 결합형태 및 동위원소 분석 등을 통한 오염원의 기원, 연대추정 등 토양오염실태 조사 방법의 개선이 필요함
- 또한 주요 이슈지역에 있어 지속적인 모니터링을 통하여 토양오염뿐만 아니라 지하수 오염으로의 확대 방지를 모색할 필요가 있음

2.3 취약지역 및 사각지역 토양 이력조사 및 관리 확대

- 기존의 공업 및 산업지로 이용되었던 이전 산업지역, 당시 축적된 토양오염 물질이 존재할 가능성이 있고, 주거지, 상업업무지, 공업지로 바뀌었거나 바뀔 가능성이 크므로 체계적인 이력조사 및 관리가 필요함
- 이러한 토양사용 이력조사를 통해 토양오염이 된 지역을 우선 관리 순위를 정하고 체계적인 관리를 시행하여야 함

참고문헌

《 참고문헌

- 당진시청, 당진시 환경보전종합계획(2016-2020년), 2016
- Shimada, N., The essence of problems on groundwater and soil pollutions caused by naturally occurring heavy metals and harmful elements : Lead, 2013
- Ohkawa et al., Presumption of the source of lead contaminated soil by isotope analysis with sequential extraction, Bunseki kagaku, 61(2), 2012
- Katahira, K., Identification of historical sources of environmental lead pollutions using lead isotope ratios in sediment cores, 2010
- 최만식 외, 동해 울릉분지 시추 퇴적물에서 안정 Pb 동위원소를 이용한 Pb의 기원 추정, 한국해양학회지, 12(4), 2007
- 최만식 외, 동해 남부 해역 퇴적물에서 Pb 동위원소를 이용한 Pb의 기원 추적 연구, 자원환경지질, 39(1), 2006
- 조완근 외, PM10 내 납의 동위원소와 농도를 활용한 산업도시지역 대기 중 납 오염원 평가, 한국환경공학회지, 33(3), 2011
-



부록

1. 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준



부록 1 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준(환경부, 2015.12)

1 호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준

< 호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준 >

항 목		등 급				
		I	II	III	IV	
유기물 및 영양염류	완전연소가능량(강 열감량, %)					13 초과
	총질소(mg/kg)					5,600 초과
	총인(mg/kg)					1,600 초과
금속류	구리(mg/kg)	60 이하	228 이하	1,890 이하	1,890 초과	
	납(mg/kg)	65 이하	154 이하	459 이하	459 초과	
	니켈(mg/kg)	53 이하	87.5 이하	330 이하	330 초과	
	비소(mg/kg)	29 이하	44.7 이하	92.1 이하	92.1 초과	
	수은(mg/kg)	0.1 이하	0.67 이하	2.14 이하	2.14 초과	
	아연(mg/kg)	363 이하	1,170 이하	13,000 이하	13,000 초과	
	카드뮴(mg/kg)	0.6 이하	1.87 이하	6.09 이하	6.09 초과	
크롬(mg/kg)	112 이하	224 이하	991 이하	991 초과		

비고 :

1. 등급별 퇴적물의 상태

가. 금속류

- I 등급 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 거의 없음
- II 등급 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 있음
- III 등급 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 비교적 높음
- IV 등급 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 매우 높음

나. 유기물, 영양염류

- IV 등급 : 심각하고 명백한 오염

2 호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준

단 계	조 건
보통	금속류 8 항목 모두 'I' 등급
약간 나쁨	금속류 8 항목 중 'II' 등급 또는 'III' 등급 항목 1개 이상
나쁨	"금속류 'II' 등급 기준 지수" 0.34 이상
매우 나쁨	'IV' 등급인 항목 1개 이상

비고 :

1. 단계별 퇴적물 지점의 상태 및 조치

- 가. 보통 : 지질이나 대기의 영향을 일반적인 정도로 받는 곳에서 나타나는 상태
- 나. 약간 나쁨 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 있으며, 독성시험을 통해 악영향 확인 필요
- 다. 나쁨 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 높으며, 조사 범위를 상하류로 확대하여 오염 규모 확인 필요
- 라. 매우 나쁨 : 심각하고 명백하게 오염되었으며, 중장기적으로 배출시설 및 공공수역 관리 필요

2. 한 지점이 여러 조건에 중복 해당될 경우 오염도 높은 단계 쪽으로 판정

- ☞ 준설은 오염된 퇴적물을 처리하는 여러 방법 중 하나로, 퇴적물 관리 선진국에서는 기준 초과뿐만 아니라 위해성 평가를 통해 실제 허용하기 어려운 악영향이 있는지 조사하여 결정(환경부 하천· 호소 퇴적물 오염평가 기준' 예규, 2015.12)
- ☞ 퇴적물 오염평가 기준 중에서 '매우 나쁨' 기준은 준설 등 정화가 필요한 퇴적물을 일차 선별하는 기준으로 활용이 가능

연구책임 | 이상신 기후변화대응연구센터 책임연구원
신우석 기후변화대응연구센터 책임연구원
연구참여 | 윤수향 기후변화대응연구센터 연구원

정책지원과제(기후변화) 2019-05
오염물질 배출시설 주변지역 과거 환경영향 기록복원 기초연구

발행일 : 2019년 09월

발행인 : 충남연구원장

발행처 : 충남연구원 서해안기후환경연구소
(32258) 충청남도 홍성군 홍북면 홍예로 360

홈페이지 www.cni.re.kr / www.shari.re.kr

발간등록번호 : -
