

하상 오염 퇴적토의 물리적인 경량화 및 난분해성 물질의 생물학적 처리

연세대학교 도시공학과 정연규
중앙대학교 토목공학과 박규홍
경원대학교 토목환경공학과 배범한
이화여자대학교 환경공학과 조경숙
(주) 서해건설

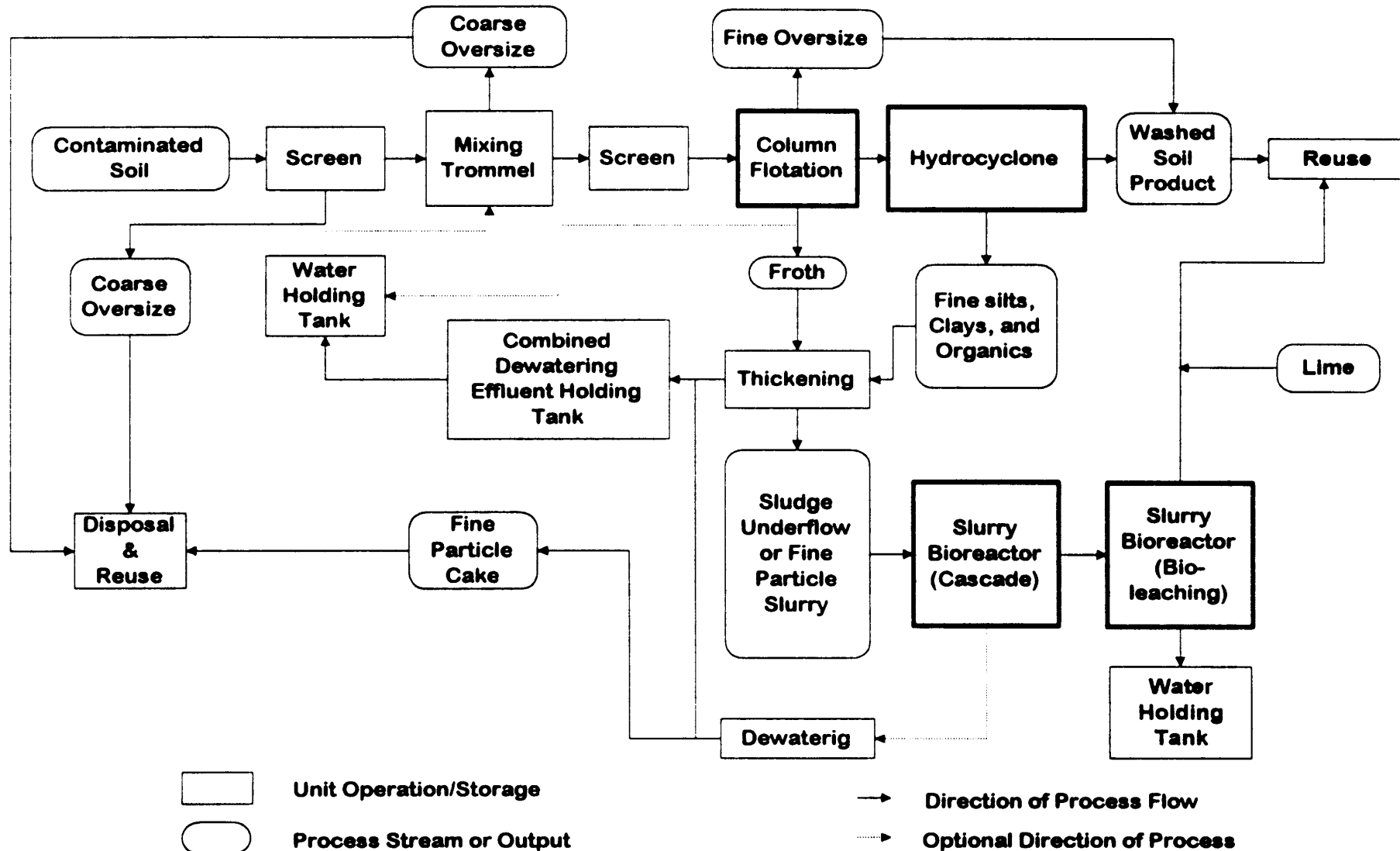
서론

- ◆ 오염된 토양 및 퇴적물은 크게는 산업화된 항구 주변에서 작게는 강, 호수, 개천 등에서 발생
- ◆ 하천이나 호소수의 오염된 토양 및 퇴적물은 수질오염의 근본적 원인을 제공하여 인간의 건강 위협
- ◆ 최근 토양과 퇴적물 오염문제가 제기됨에 따라 오염토양의 정화를 위한 새로운 기술들이 빠르게 개발, 발전되는 추세

통합처리공정

- ◆ 다양한 유기화합물, 중금속 등의 난분해성 물질의 처리를 위한 퇴적 준설물의 이동식 처리처분시스템 제작
- ◆ 물리화학적 슬러리 처리 시스템
 - Hydrocyclone, 부상분리공정
- ◆ 생물학적 슬러리 처리 시스템
 - 중금속, PAH 제거

TOTAL SYSTEM FLOW



PART 1

Hydrocyclone을 이용한
다단계식 입자 분류 시스템
개발

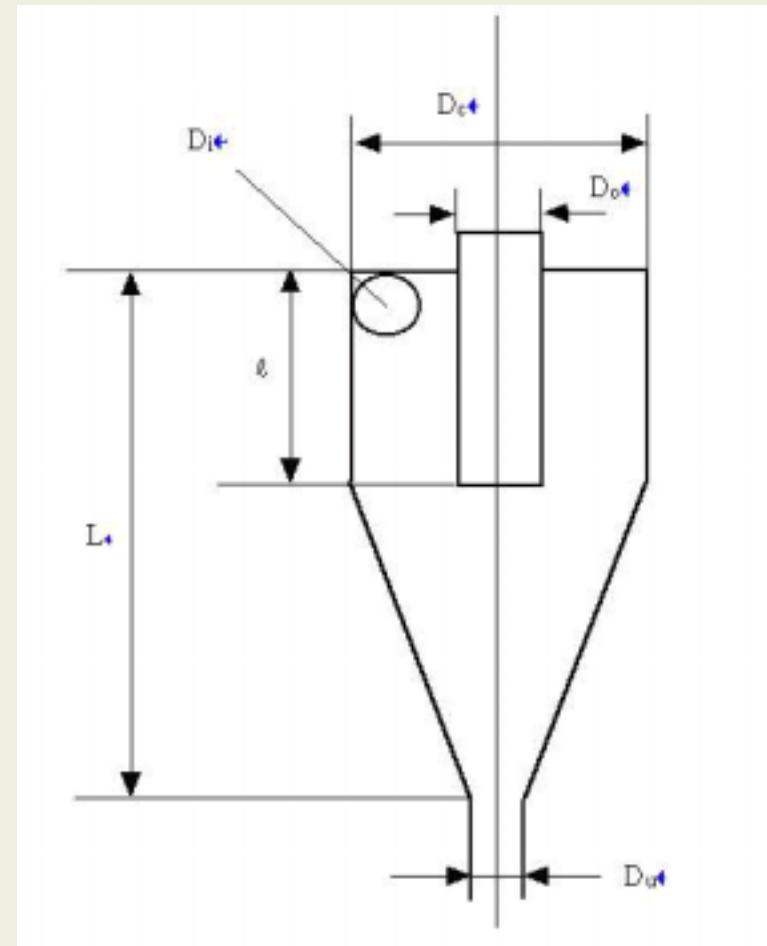
1. Hydrocyclone의 이론과 구성

◆ Hydrocyclone의 개요

- 원심력을 이용해 유체의 비중 차이에 의해 유체로부터 미립 현탁액을 분리하는 장치
- 유체에 의해 vortex motion이 발생
- 설치면적이 적고 비용이 비교적 저렴하며 설치가 용이함
- 소형의 장치로서 연속적으로 많은 양을 처리할 수 있는 경제적 이점

1. Hydrocyclone의 이론과 구성

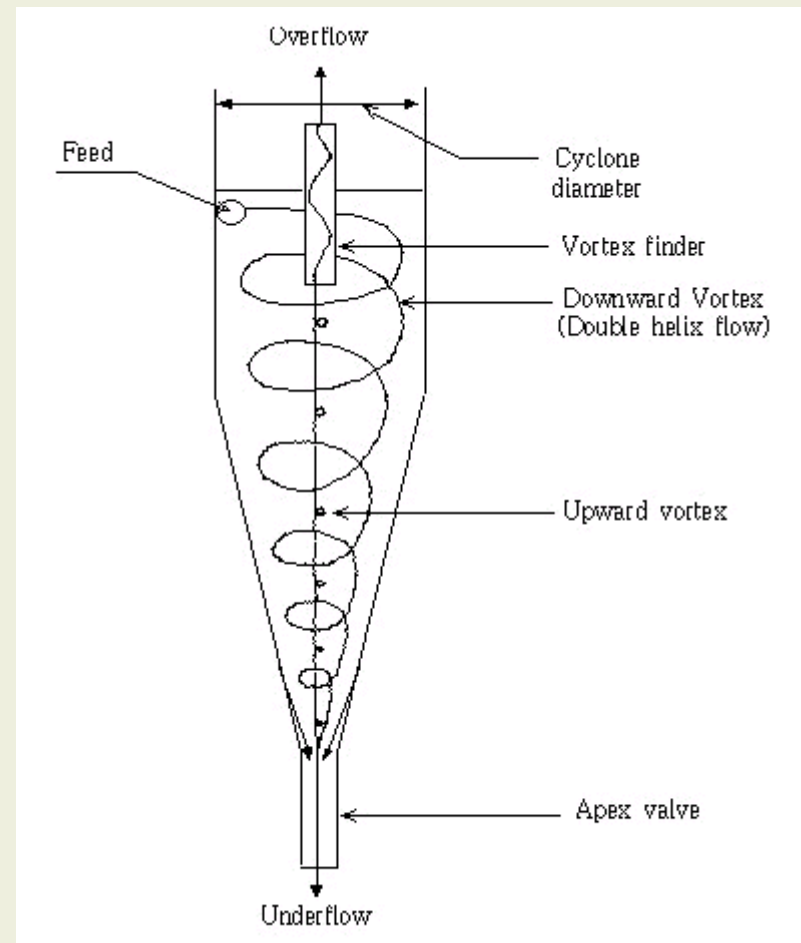
- ◆ Hydrocyclone의 구성
 - 원통부와 실린더부인 콘부 연결
 - 유입부와 유출부, 입자 받이부
 - D_i : 유입구경
 - D_c : 몸통지경
 - D_o : 상부직경
 - L : 몸통 전체 길이
 - l : voltex finder 길이
 - D_u : 하부직경



1. Hydrocyclone의 이론과 구성

◆ Hydrocyclone 내의 유체와 입자의 거동

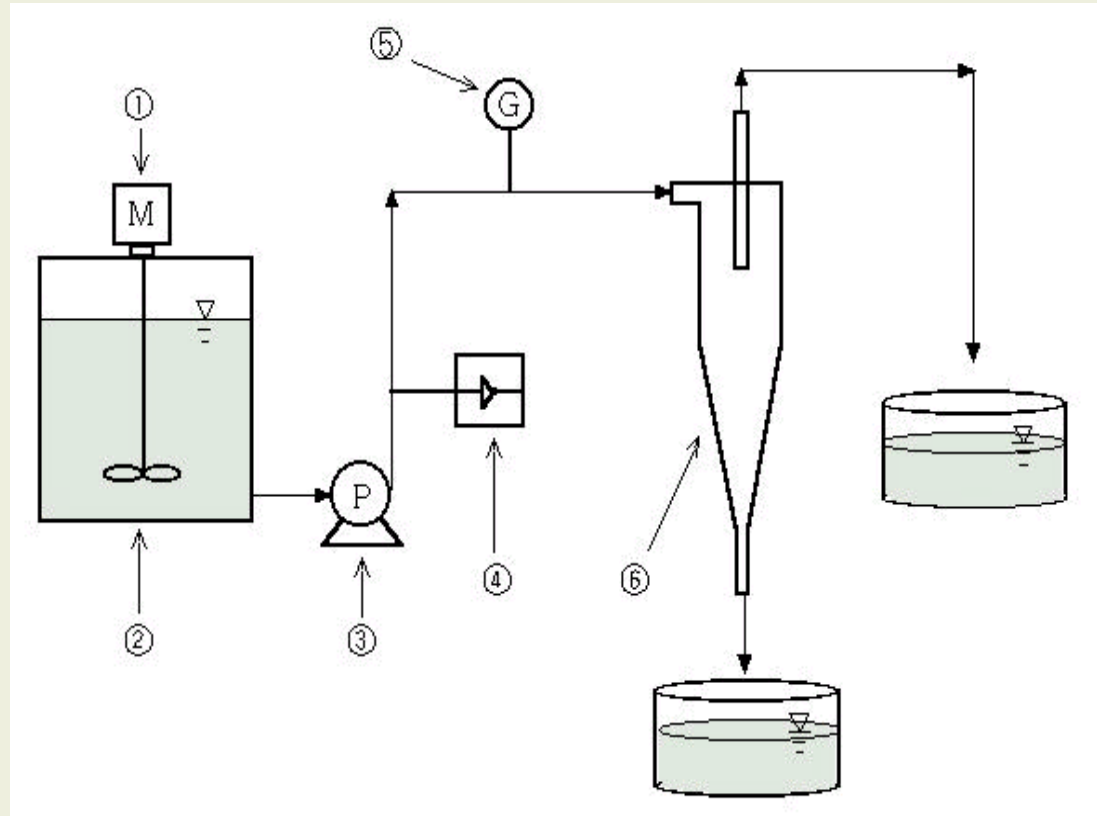
- 접선속도
- 반경속도
- 축방향속도



2. 실험 장치 및 방법

◆ 실험공정개략도

1. 교반기
2. 저장조
3. 펌프
4. Inverter
5. 압력계
6. Hydrocyclone

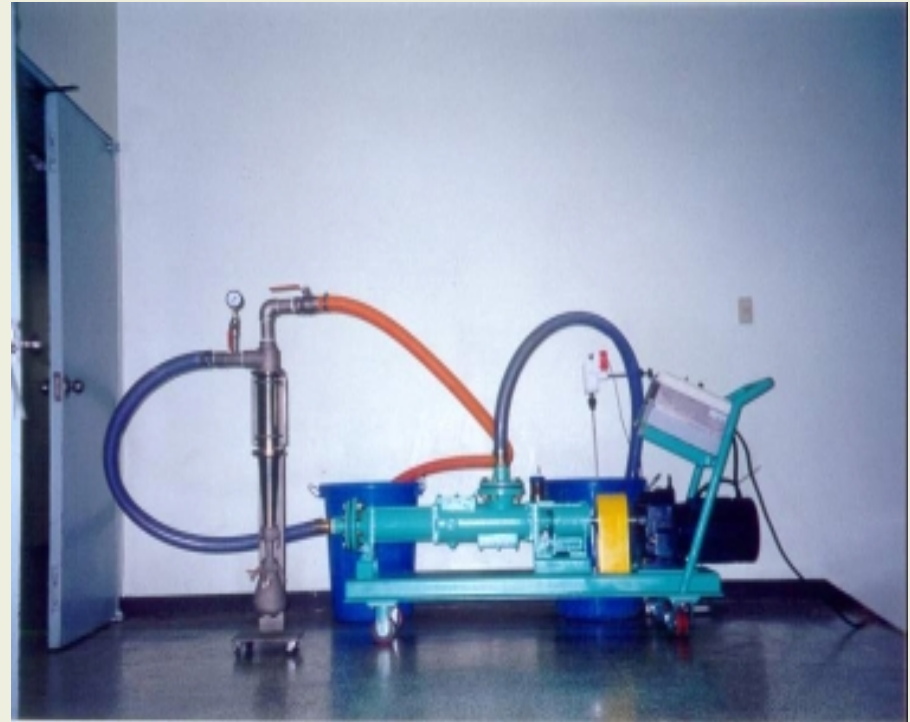


2. 실험 장치 및 방법

◆ 실험 장치



Hydrocyclone A



Hydrocyclone B

2. 실험 장치 및 방법

◆ Hydrocyclone 의 기하학적 비율

	D_i / D_c	D_o / D_c	l / D_c	L / D_c	Angle θ , degree
HYDROCYCLONE A	0.22	0.424	1.16	10.4	9.1
HYDROCYCLONE B					

2. 실험 장치 및 방법

◆ 실험 인자

- 시료특성에 따른 제거효율
- 고형물 농도별 특성 : 3%, 7%, 10%
- 유입 압력별 특성
: 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 kg/cm²
- voltex finder 길이 변화
: 25, 22.5, 20, 17.5, 15cm
- COD mass transfer : 상부 유출물의 mass에 대한 COD 함유율

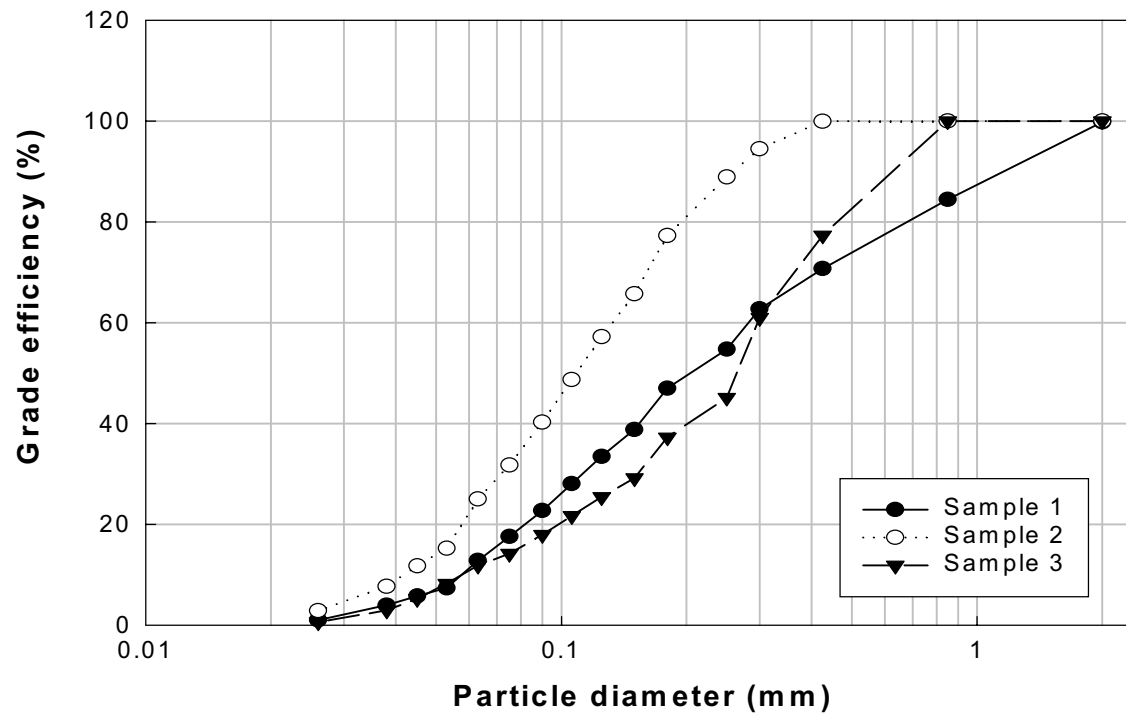
2. 실험 장치 및 방법

◆ 시료 특성

Contents		Sample 1	Sample 2	Sample 3
Weight percentages (%)	Coarse sand (2.0-0.25mm)	45.28	11.11	54.87
	Fine sand (0.25-0.05mm)	47.33	73.67	36.90
	Silt, Clay (0.05mm이하)	7.39	15.22	8.22
d_{50} (μm) - cut size		200	110	270
$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ (균등계수) ²⁾		4.83	3.10	4.83
pH		8.4	7.8	7.9
Water content (%)		5.34	1.31	0.52
Organic matter content (%)		2.66	3.34	2.03
Specific gravity (비중)		2.70	2.71	2.65
Particle density		1.47	1.31	1.52

2. 실험 장치 및 방법

◆ 시료 1,2,3의 입자가적곡선



3. 실험 결과 및 고찰

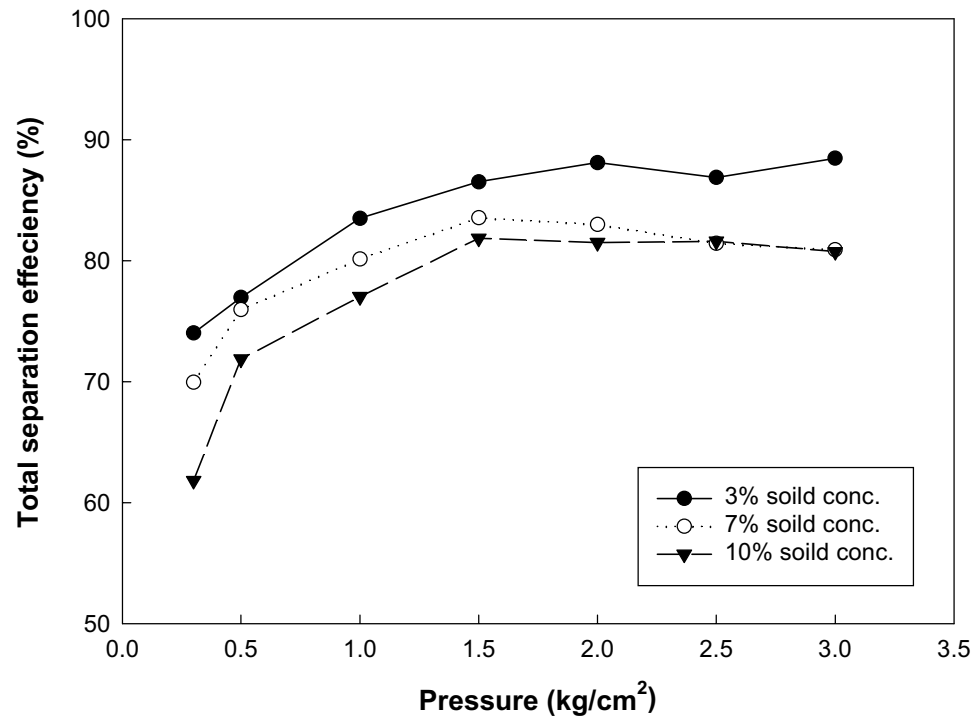
◆ 유입 압력 및 고형물 농도에 따른 Hydrocyclone의 입자 분리 효율

(1) Hydrocyclone A ($D_c = 20.5 \text{ cm}$)

- 유입고형물농도가 증가할수록 분리효율이 감소
- 유입압력이 1.5 kg/cm^2 까지는 증가할수록 분리 효율이 증가
- 0.5 kg/cm^2 의 낮은 압력에서는 유입고형물이 증가할수록 그래프의 기울기가 급해짐
- > 이는 낮은 압력일 때 고형물농도에 민감함
(contour plot 참조)

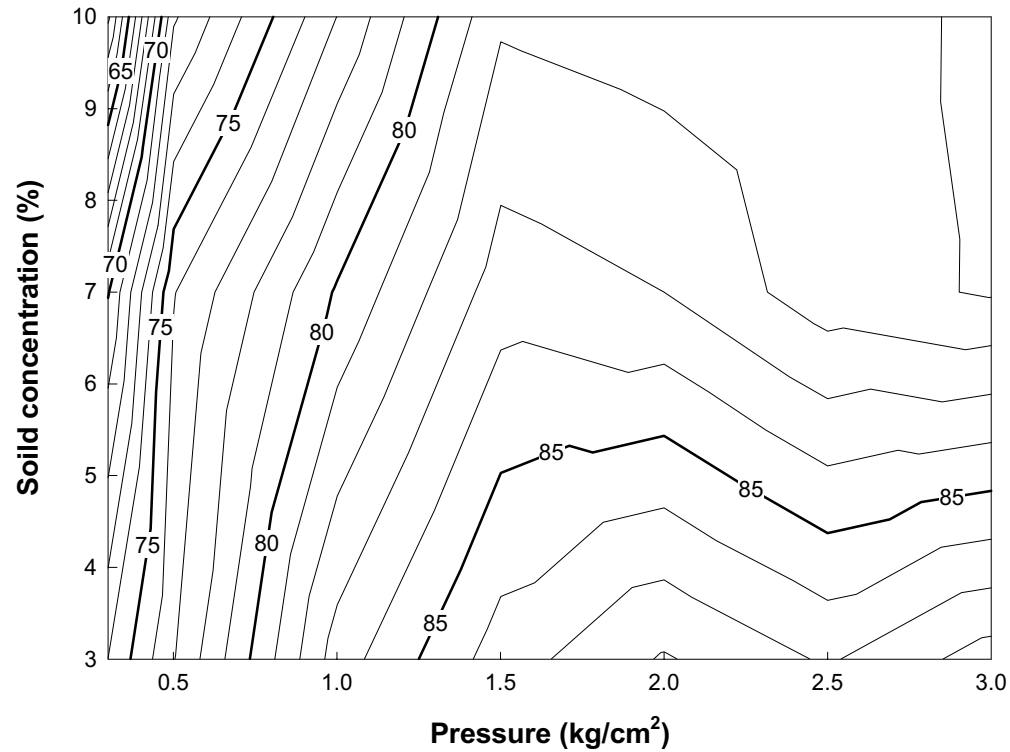
3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ 고형물농도와 압력에 따른 Hydrocyclone A의 분리효율 곡선 (시료 1)



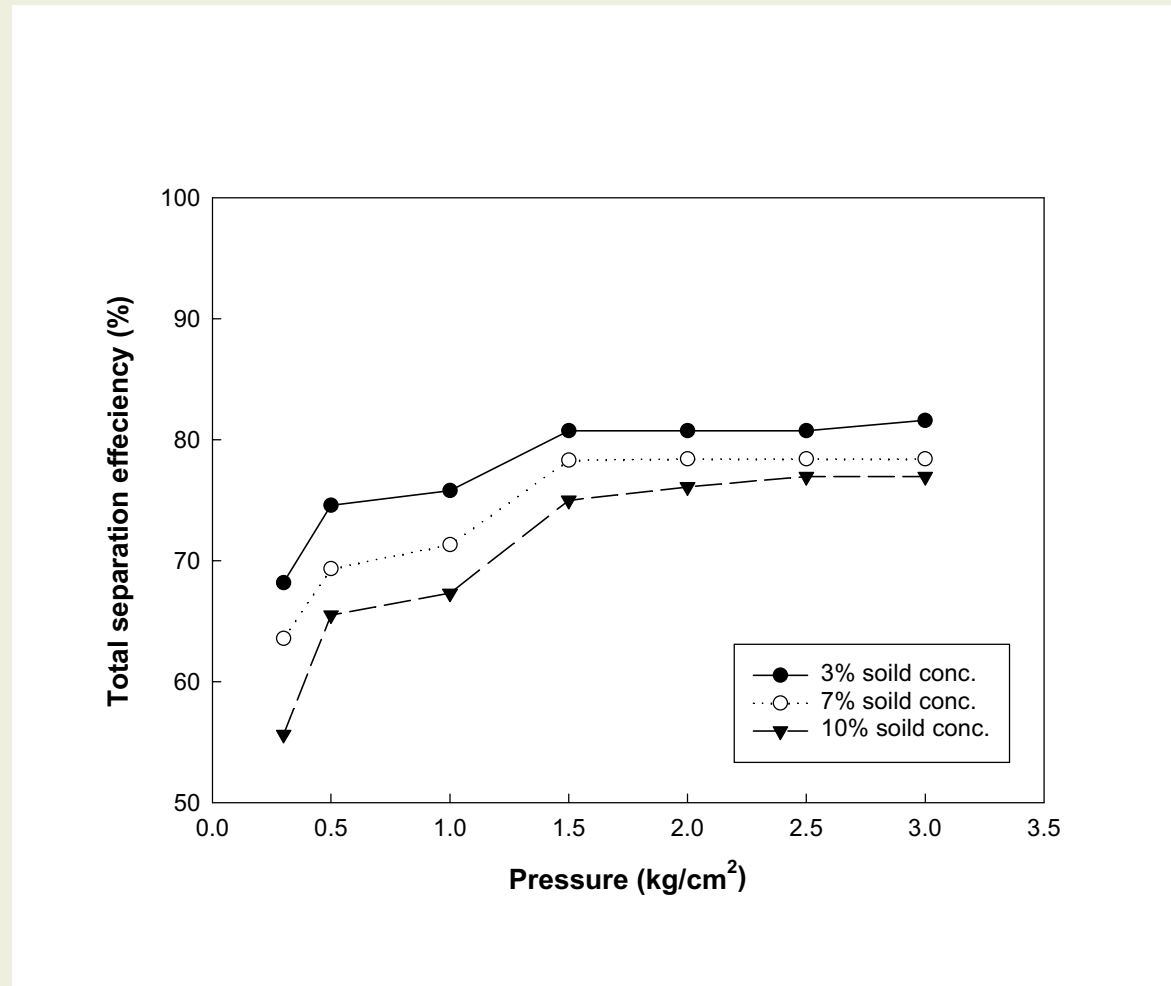
3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ 고형물농도와 압력에 따른 Hydrocyclone A의 분리효율 곡선 (시료 1) – contour plot



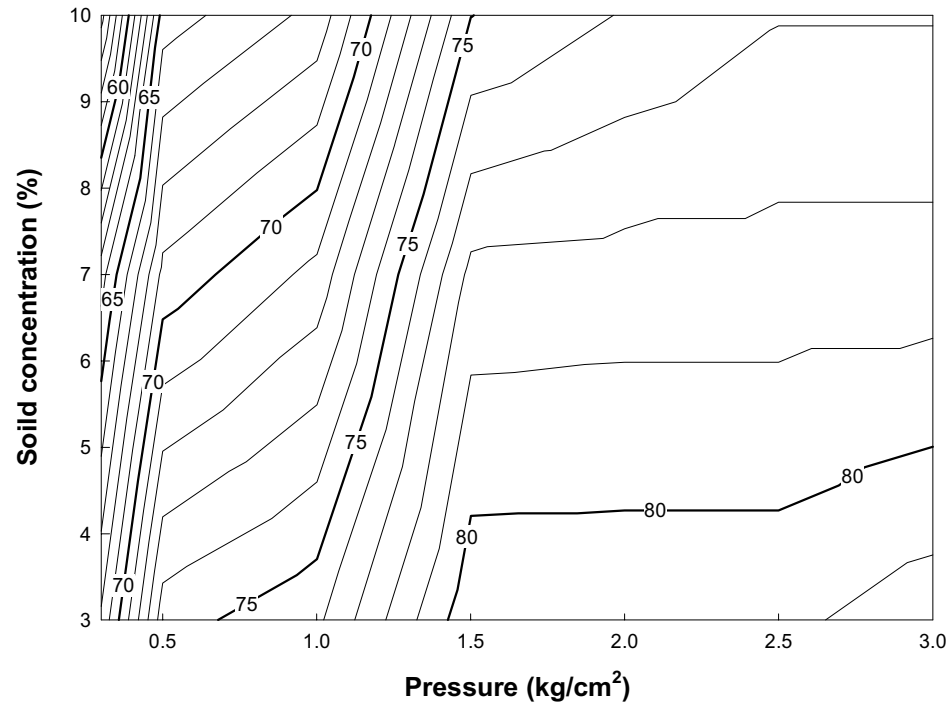
3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ 고형물농도와 압력에 따른 Hydrocyclone A의 분리효율 곡선 (시료 2)



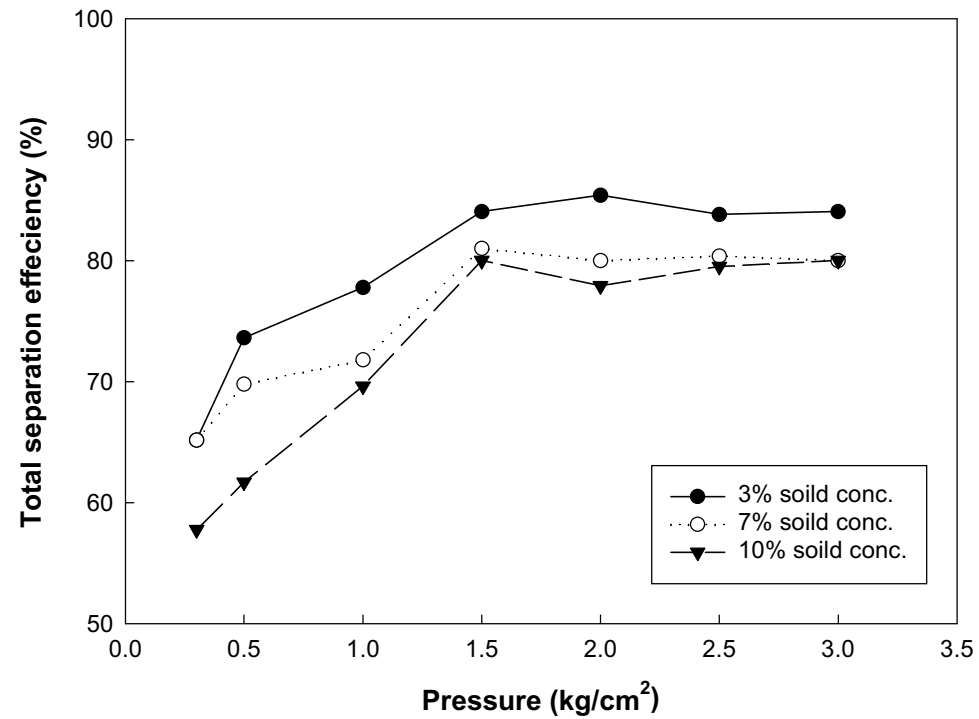
3. 실험 결과 및 고찰

- 고형물농도와 압력에 따른 Hydrocyclone A의 분리효율 곡선 (시료 2) – contour plot



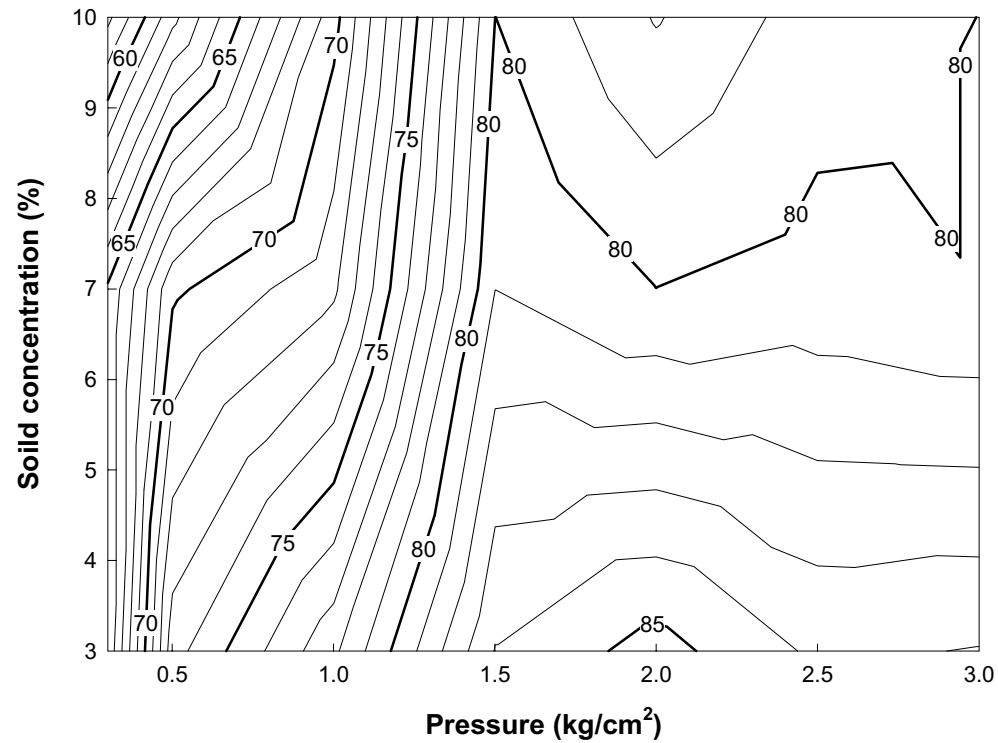
3. 실험 결과 및 고찰

◆ 고형물농도와 압력에 따른 Hydrocyclone A의 분리효율 곡선 (시료 3)



3. 실험 결과 및 고찰

- 고형물농도와 압력에 따른 Hydrocyclone A의 분리효율 곡선 (시료 3) – contour plot



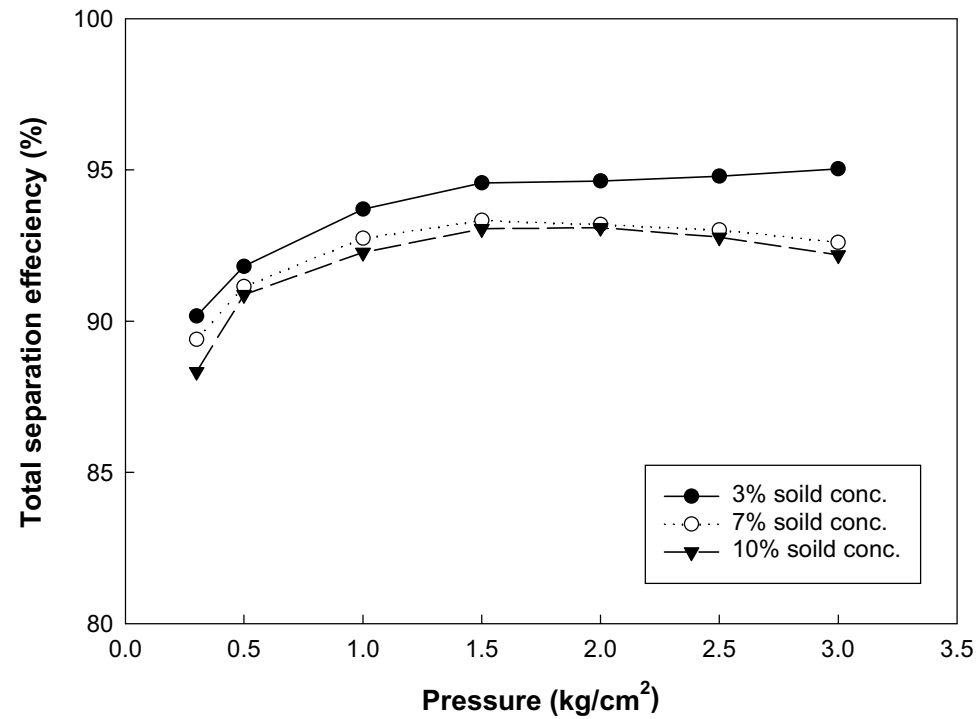
3. 실험 결과 및 고찰

(2) Hydrocyclone B ($D_c = 7.5 \text{ cm}$)

- Hydrocyclone A에 비해 분리효율향상
시료 1 : 0.5 kg/cm^2 이상에서 고형물농도에 관계없이
90%이상의 분리효율을 나타냄
시료 2, 3: 10%유입고형물을 제외하고는 1.0 kg/cm^2
압력이상에서 90%이상의 입자분리효율을 나타냄
- 유입고형물농도가 낮을수록 좋은 분리효율을 나타내며, 1.5 kg/cm^2 압력이 최적압력으로 나타남

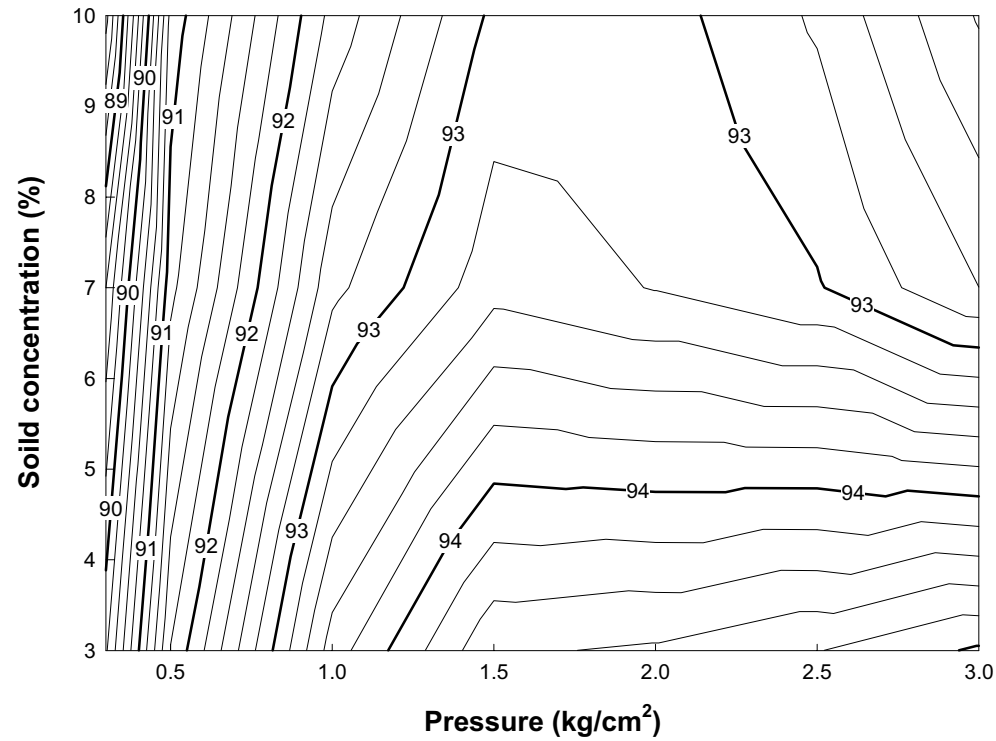
3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ 고형물농도와 압력에 따른 Hydrocyclone B의 분리효율 곡선 (시료 1)



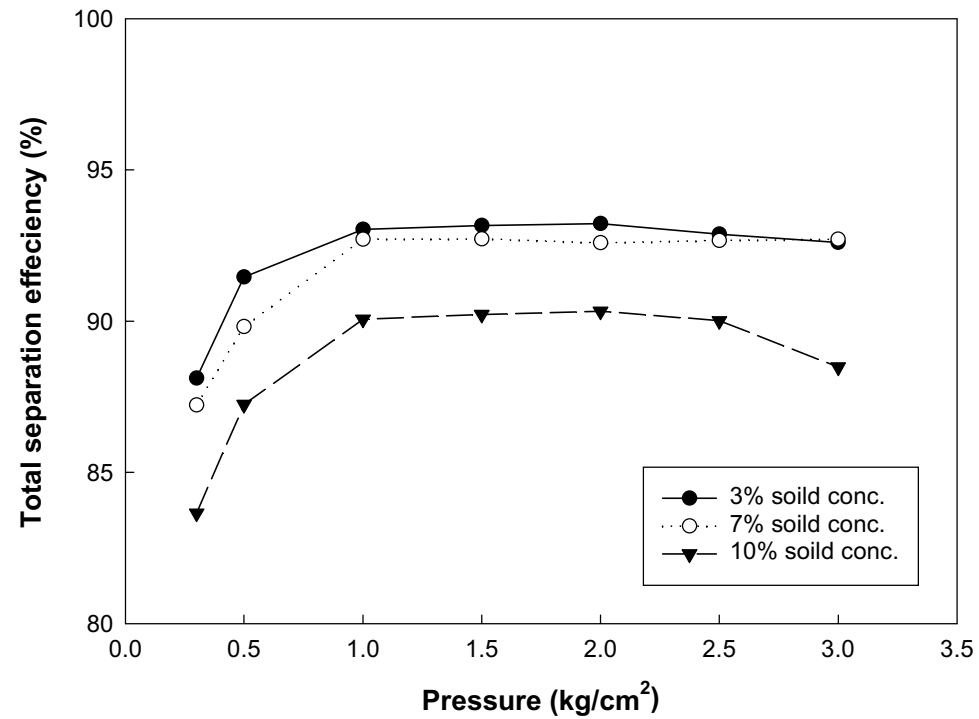
3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ 고형물농도와 압력에 따른 Hydrocyclone B의 분리효율 곡선 (시료 1) – contour plot



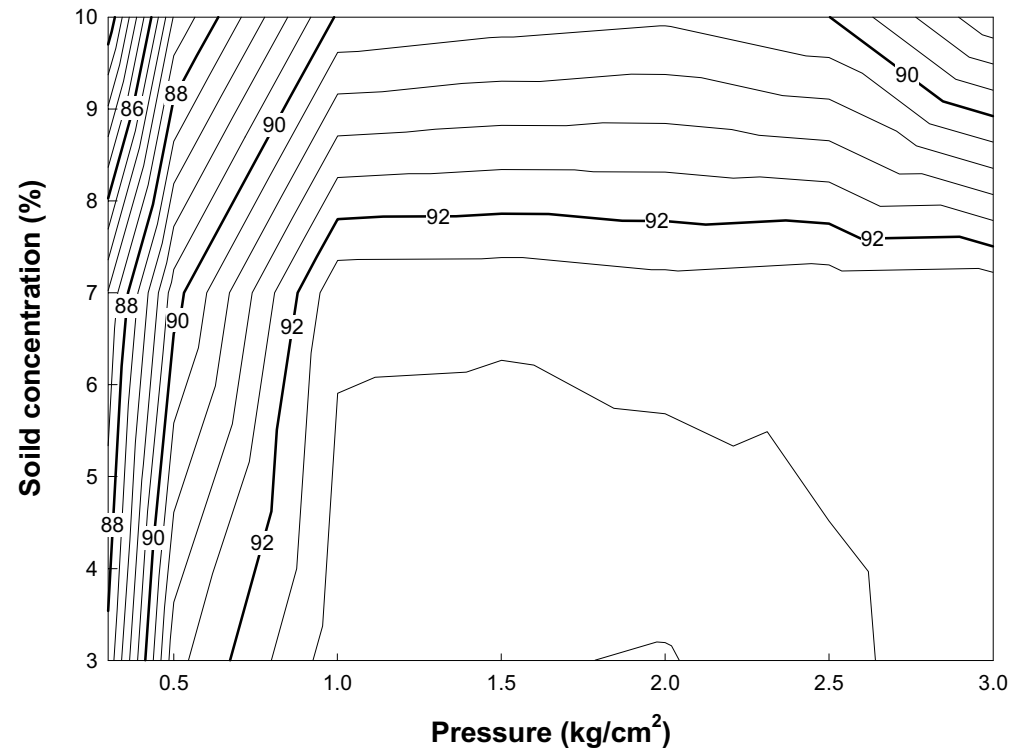
3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ 고형물농도와 압력에 따른 Hydrocyclone B의 분리효율 곡선 (시료 2)



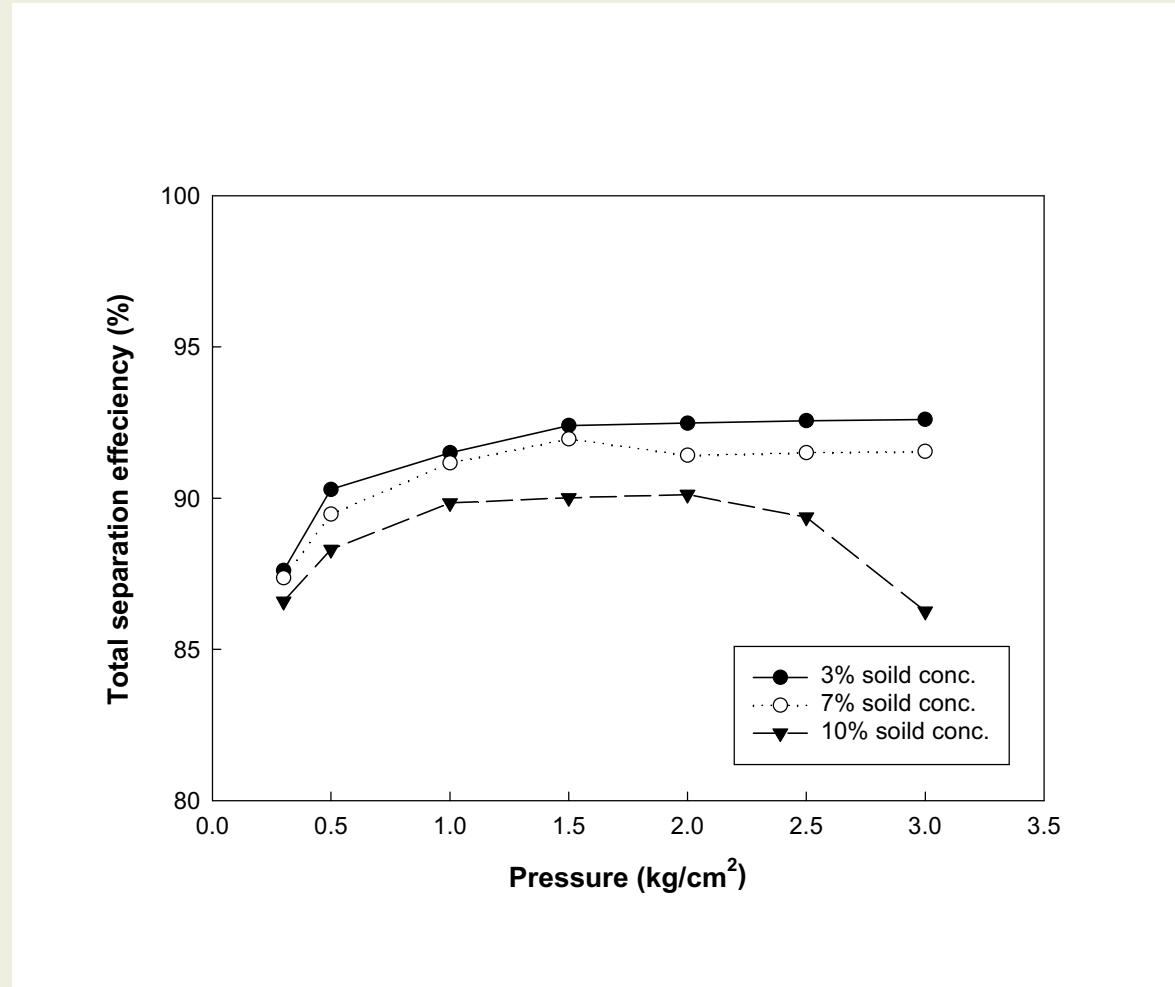
3. 실험 결과 및 고찰

- 고형물농도와 압력에 따른 Hydrocyclone B의 분리효율 곡선 (시료 2) – contour plot



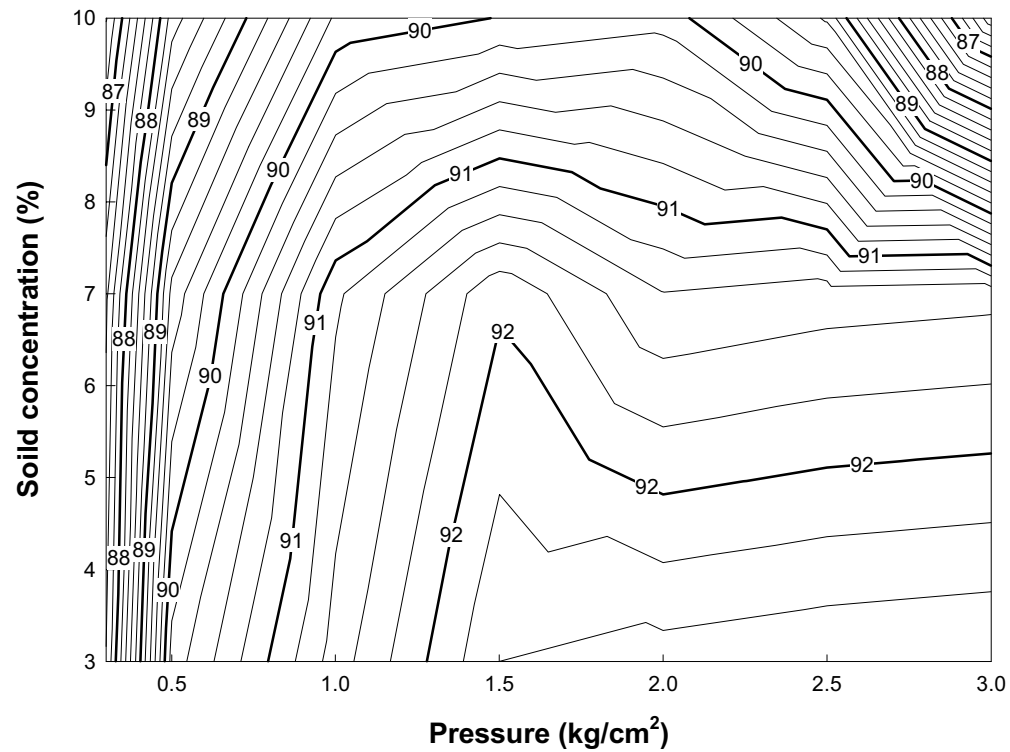
3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ 고형물농도와 압력에 따른 Hydrocyclone B의 분리효율 곡선 (시료 3)



3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ 고형물농도와 압력에 따른 Hydrocyclone B의 분리효율 곡선 (시료 3) – contour plot



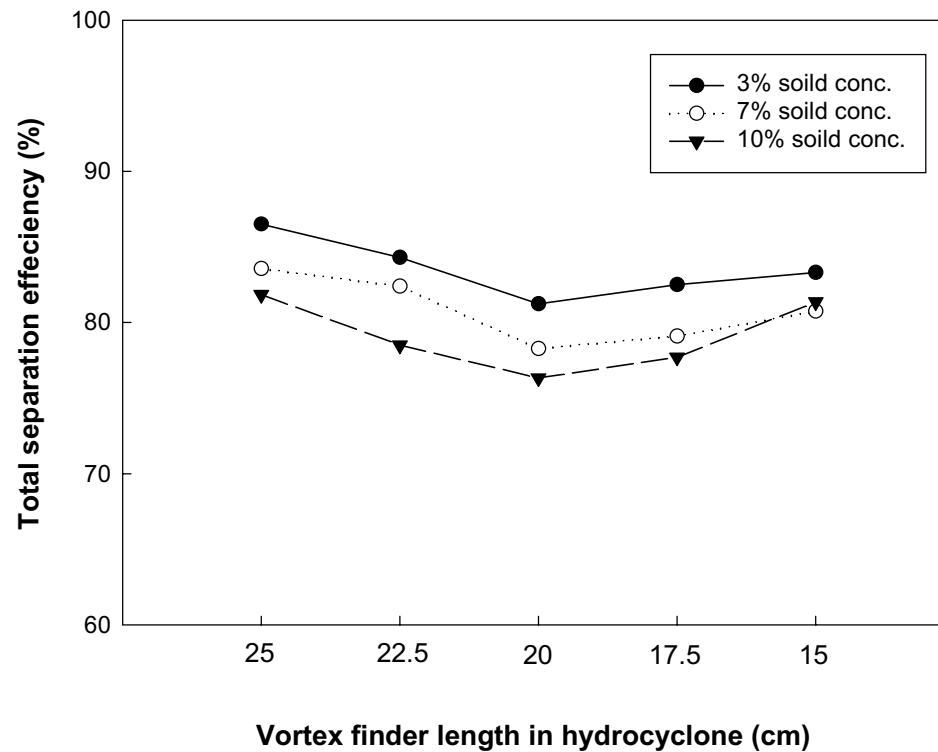
3. 실험 결과 및 고찰

◆ voltex finder의 길이 변화에 따른 Hydrocyclone의 입자 분리 효율

- vortex finder의 길이의 위치에 따라 유입해서 들어오는 유체와 상향류에 난류가 형성 -> 입자 분리 방해
- 시료 1, 2, 3에 대해 hydrocyclone A에서 압력을 $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 고정한 후 실험
- vortex finder의 길이가 20cm일 때 분리효율이 가장 낮게 도출됨 -> 난류에 의한 방해작용 극대화
- 시료 1에서는 시료 2, 3보다 깊이 변화에 대해 비교적 분리효율의 변동이 크지 않음

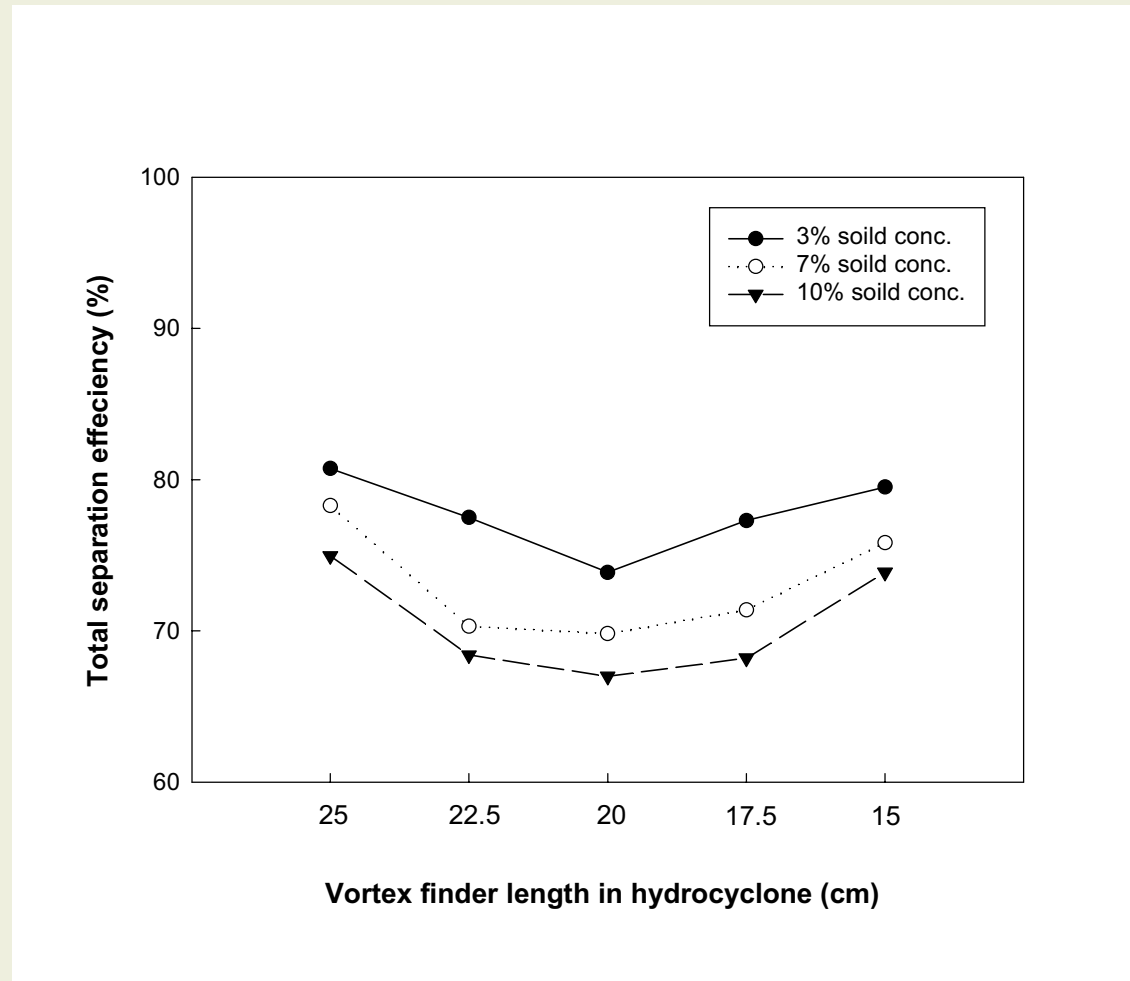
3. 실험 결과 및 고찰

◆ Voltex finder의 길이에 따른 입경 분리 효율 (시료 1)



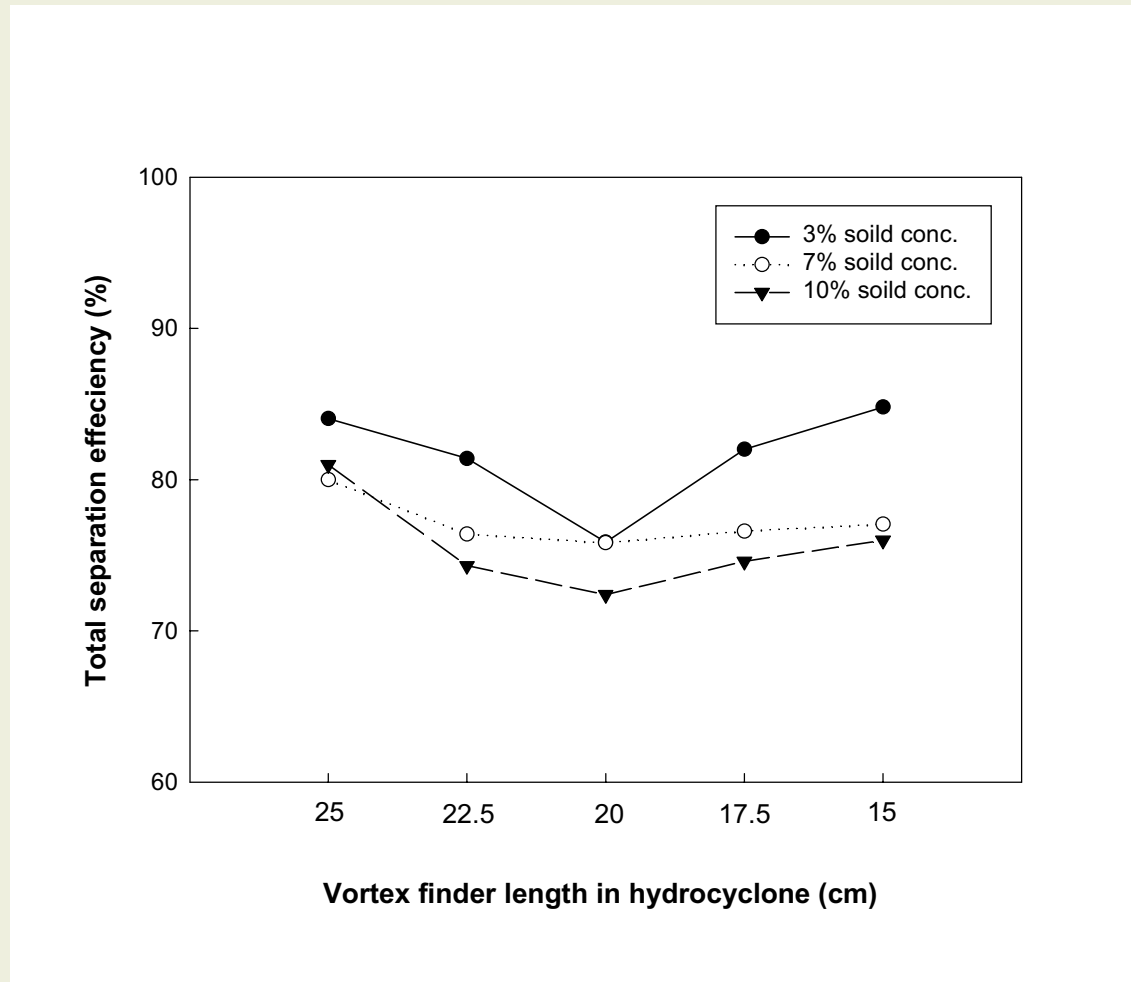
3. 실험 결과 및 고찰

◆ Voltex finder의 길이에 따른 입경 분리 효율 (시료 2)



3. 실험 결과 및 고찰

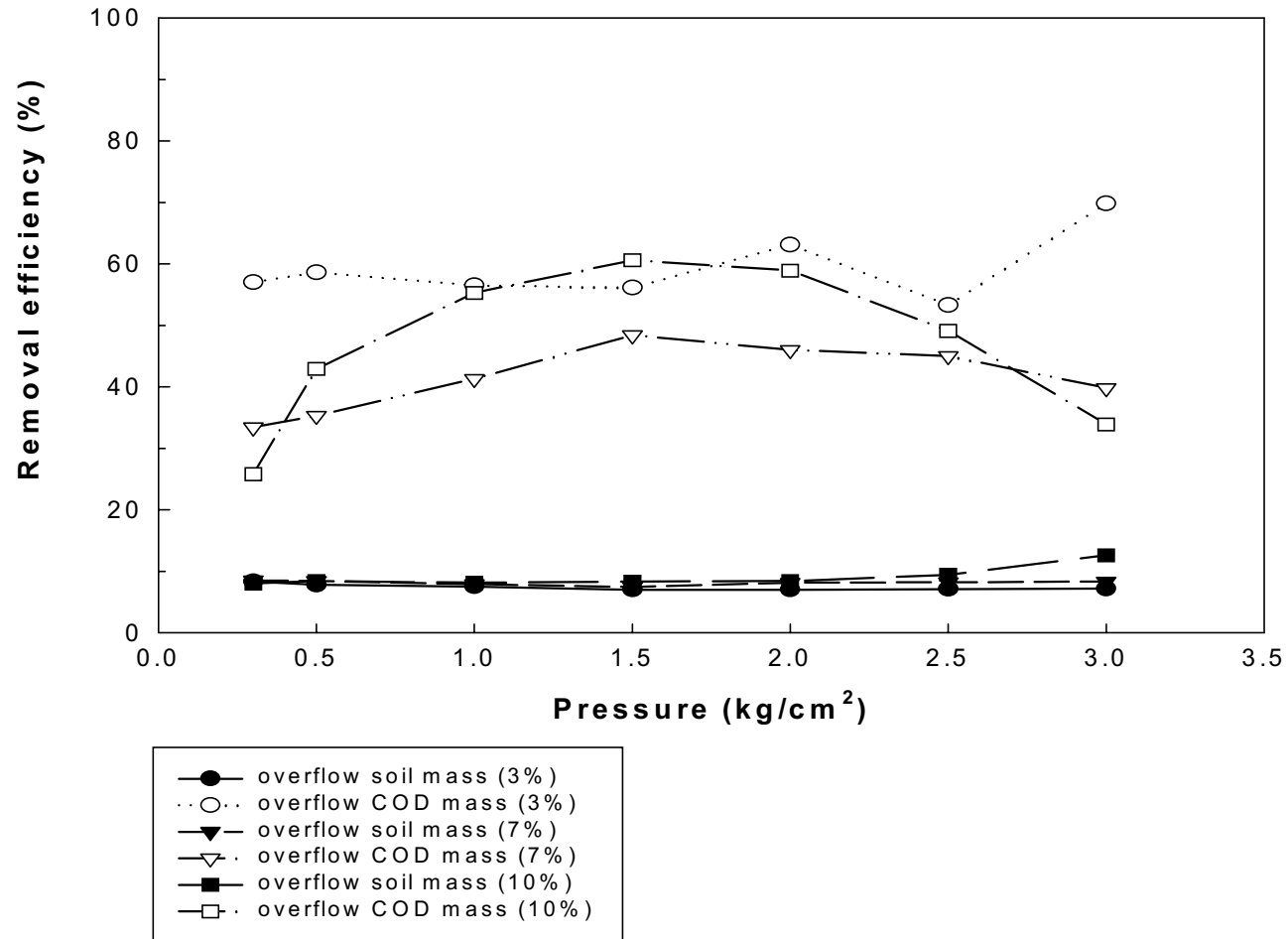
◆ Voltex finder의 길이에 따른 입경 분리 효율 (시료 3)



3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ COD mass transfer : 상부 유출물의 mass에 대한 COD 함유율
 - 입자 오염물의 이동경로로서 상부로 배출되는 입자의 Mass 는 총 유입량에 대하여 10% 정도이지만 COD Mass 로서는 50% 정도 제거되는 양상을 나타냄
 - Silt, Clay가 다량 함유된 상부 유출물에 오염도가 집중됨을 알 수 있음

3. 실험 결과 및 고찰



4. 결론

- ◆ 압력별 실험 결과 모든 시료에 대하여 1.5kg/cm^2 정도에서 최적 입경 분리 효율을 나타냄
- ◆ 고형물 농도가 높아질수록 처리 효율은 낮아지는 경향을 보임
- ◆ Voltex finder의 길이에 대하여 20cm 정도에서 가장 비효율적이며 이는 유체의 난류에 의한 방해작용으로 추정됨
- ◆ 상부 유출물의 mass에 대한 COD 함유율을 통해 **Silt, Clay**가 다량 함유된 상부 유출물에 오염도가 집중됨을 알 수 있음

PART 2

퇴적준설물 처분량의
경량화를 위한
부상분리공정의 개발

1. 이론적 배경

- ◆ 부상충전탑을 이용한 여러가지 입자의 분리효과는 그 입자들의 표면특성차이에서 기인
- ◆ 일반적으로 무기물은 친수성(hydrophilic) 경향이 있고, 유기물은 무기물에 비해 소수성(hydrophobic)을 띠는 경향이 있다.

이때, 소량의 수집제(collector)가 첨가되면, 유기물 입자는 수집제와 부착되어 소수성을 띠게 되고, 공기방울 표면에 부착하여 부상탑 상부로 배출 되는 것이다.

2. 부상메카니즘

- ◆ 부상개탑과 부상충전탑을 포함한 부상계에서 일반적인 메카니즘
 - (1) 입자가 pulp에서 공기방울 표면으로 부착
 - (2) 입자가 공기방울 표면에서 pulp층으로 탈착
- ◆ 입자가 pulp에서 공기방울 표면으로 이동하는 현상
 - (1) 주로 소수성 표면을 가진 입자에 대해 진행되는 입자 - 공기 방울간 부착(attachment)
 - (2) 친수성과 작은 입자에서의 입자편승 (particle-entrainment)

2. 부상메카니즘(계속)

- ◆ Harris가 제안한 입자이송 메카니즘
 - (1) 공기방울로 부착(attachment)
 - (2) 입자-공기방울 결합속으로 기계적 포획
(mechanical entrapping)
 - (3) 세척분리(elutriation)
 - (4) 상승하는 공기방울 틈새의 물에 편승(entrainment)

2. 부상 메카니즘(계속)

◆ 입자와 공기방울 부착(attachment)

- ◆ 입자가 거품층으로 유입되어 부상류로 월류해 나가는 과정

(1) 부상하던 공기방울은 거품층 하부의 공기방울과 충돌하며, 부상하는 공기방울의 상단부와 거품층에 먼저 올라와 있던 공기방울의 하단부에 부착되어 있던 입자와의 사이에 얇은 막이 형성된다. 이 얇은 막이 깨지면서 그 입자는 부상중인 공기방울에 부착되게 되며, 결국, 부상하던 공기방울은 그 이전에 먼저 도달해 있던 공기방울층의 일부가 된다.

2. 부상 메카니즘(계속)

- (2) 입자의 양측에 x , y , z 축방향으로 같은 크기의 힘을 받으면서 먼저 올라온 공기방울층은 다음층으로 밀린다. 이때 입자들이 재배열되고 판상수로를 통해 이동하는 현상이 나타난다
- (3) 수로내에서 물의 배수에 의해 거품이 탈수되는 동시에 얇은 막과 수로내에서 입자가 수평, 수직으로 이동하는 현상이 나타난다.
- (4) 윗층은 수평방향으로 이동한다.

2. 부상 메카니즘(계속)

◆ 기계적 포획에 의한 입자편승

◆ Jowett의 이론

두개의 조합된 부상 system에서 거품층으로 유입되는 광물질량은 feed에 포함된 광물질의 양에 비례

◆ Mika와 Herbst의 이론

거품속으로 들어와서 공기방울을 둘러싼 물의 경계층으로 포획되는 비부상물질과 물과의 비율이라는 개념을 사용

부상에서 이 경계층의 규모는 공기와 물의 접촉면에서의 수화작용효과와 pulp의 교란정도에 의해 제어

2. 부상 메카니즘(계속)

◆ 세척분리

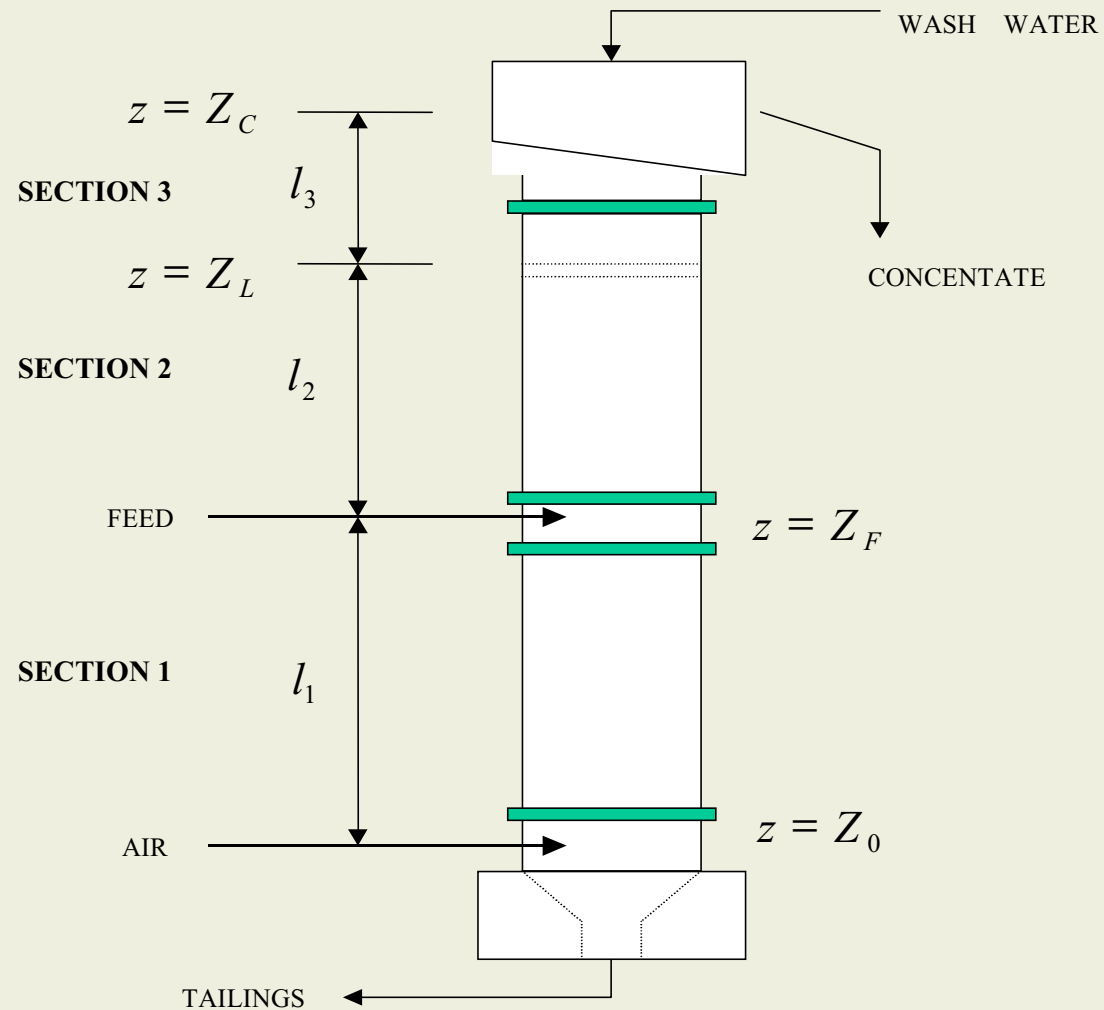
- ◆ 입자가 공기방울에 접촉한 후 다시 pulp층으로 이송되는 두가지 메카니즘
 - (1) 입자-공기방울 부착에 의해 수집된 입자와 공기방울과의 분리
 - (2) 입자편승에 의해 수집된 입자와 공기방울과의 분리로서 이러한 분리공정은 거품층에서의 두번째 농축효과에 의한 것

2. 부상 메카니즘(계속)

- ◆ Woodburn등은 입자의 분리공정을 입자가 갑작스런 가속에 의해 붙어있던 공기방울에서 비틀리는 것에 의한다고 추정
- ◆ Jowett는 입자가 극한치를 넘어서게 부착한 공기방울에 가속이 붙을때 입자의 분리가 일어난다고 생각

3. 실험장치 및 방법

◆ 충전부상탑의 예시도



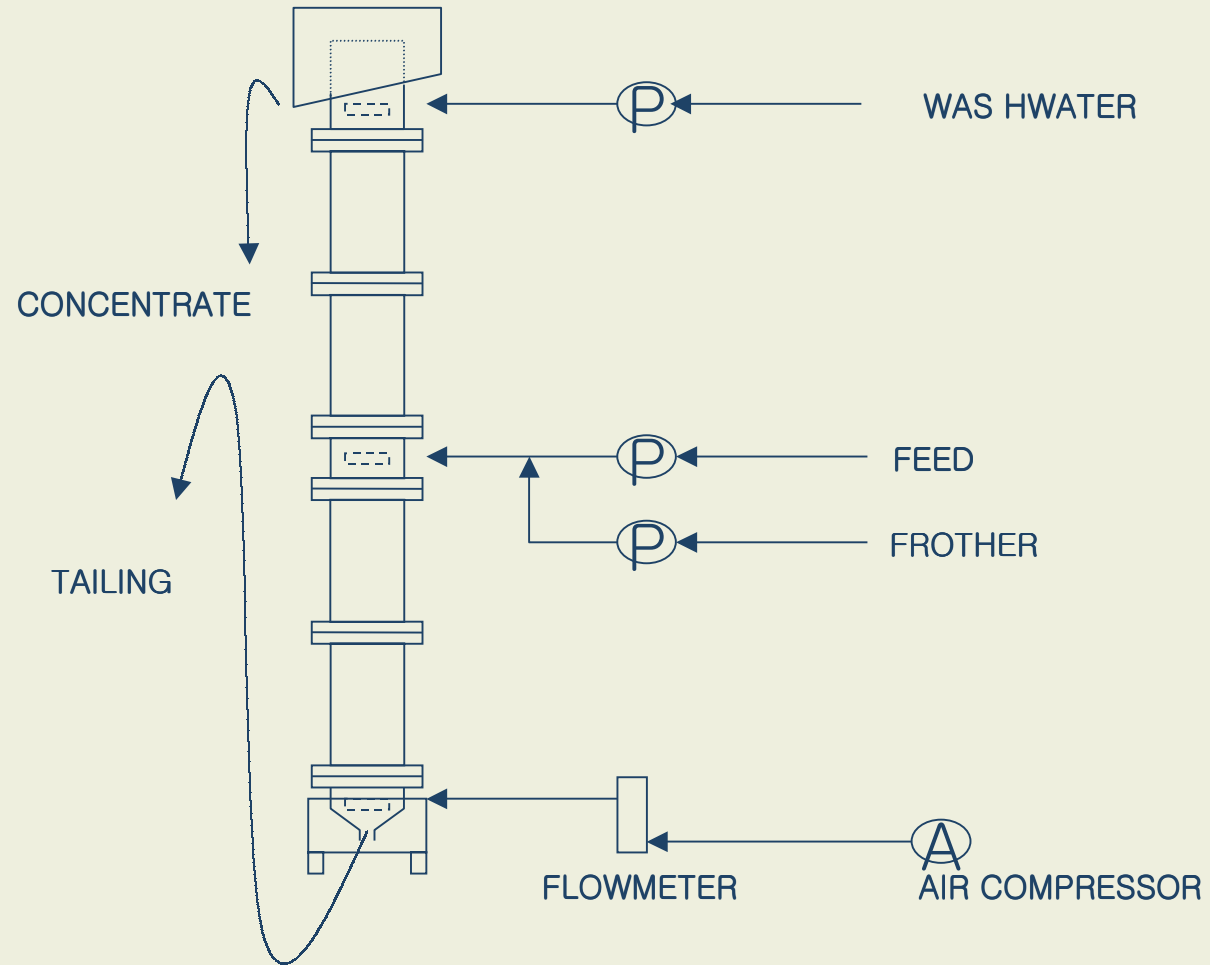
3. 실험장치 및 방법(계속)

◆ 충전탑의 설계

- ◆ 부상충전탑은 기존의 부상개탑과 마찬가지로 비부상물질(TAILINGS)의 배출이 탑하부에서, 농축물질(CONCENTRATE)의 수집은 탑상부에서 일어난다. 공기는 탑하부에서 분사되고 탑상부로 상승함에 따라 충전물질에 의해 분산된다.
- ◆ 충전탑은 그림에서 보는 바와 같이 충전탑 상부에는 세척수를 흘려보낼수 있는 장치가 되어 있고 그 위로 부상농축류가 배출된다.

3. 실험장치 및 방법(계속)

◆ 충전탑의 개략도

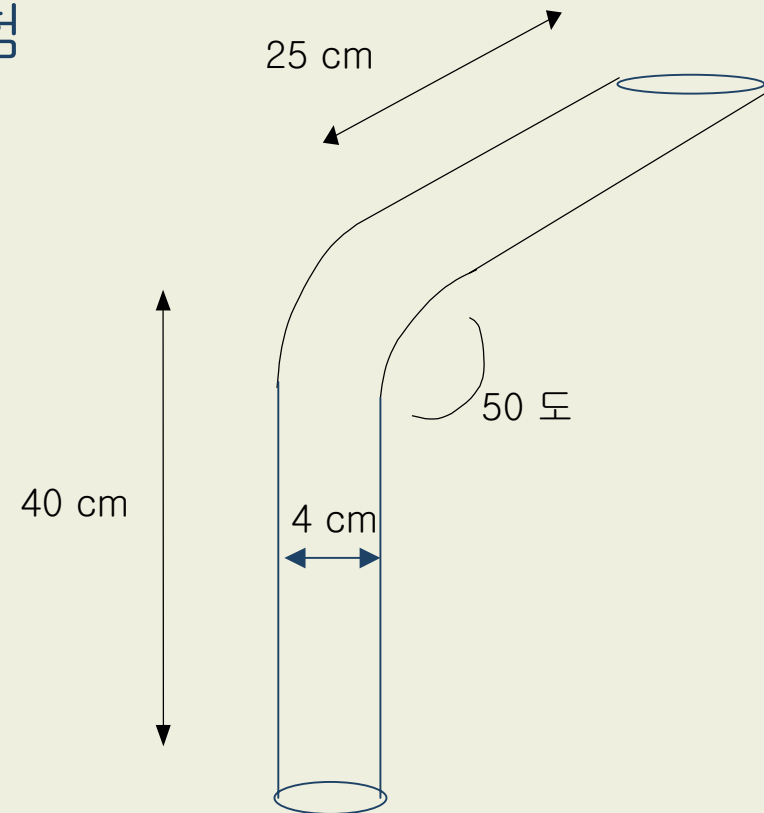


4. 연구수행 내용

- ◆ 부상분리모델의 일반화
 - ◆ 민감도 분석을 통해 각 운전변수의 부상탑 효율에 대한 민감도를 확인
 - ◆ ENVIROSOFT 2000 Conference에서 "Packed column flotation model for the selective separation of contaminated dredged sediment" 의 제목으로 각 운전변수의 부상탑 효율에 대한 민감도분석 결과 발표
 - ◆ 회분식 실험에 의해 얻어진 부착율을 모델 예측값과 비교하고 이를 통하여 모델을 보정

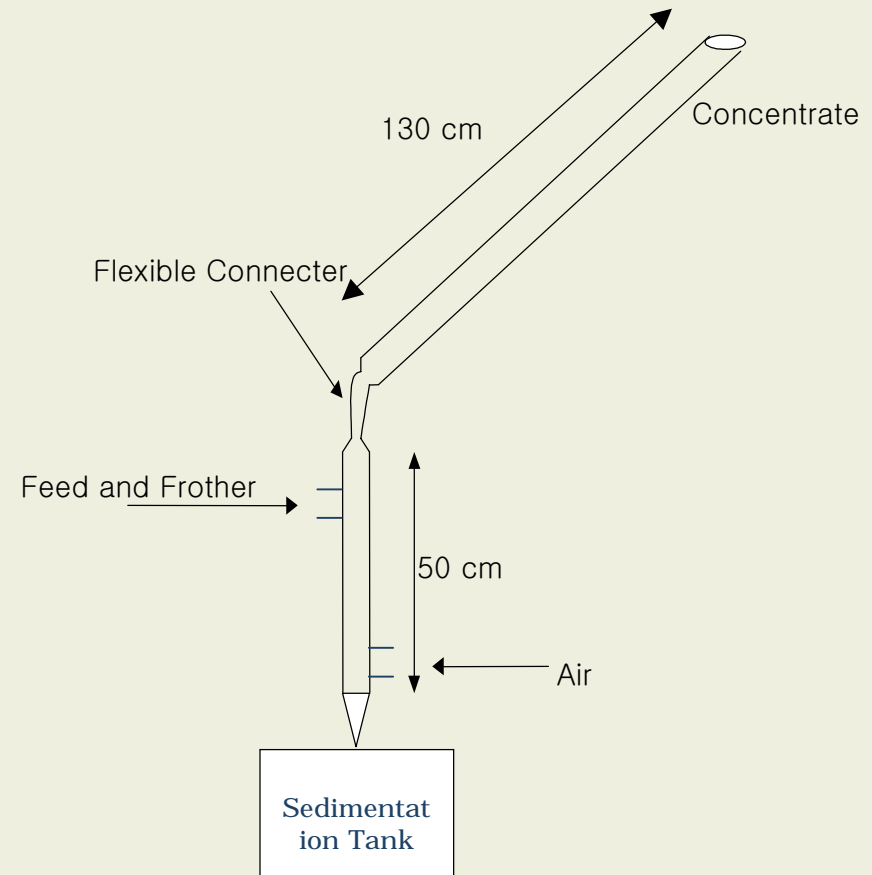
4. 연구수행 내용(계속)

- ◆ Batch Hallimond Tube 실험
 - ◆ 거품제(Frother) screening test에 사용한 회분식 실험 결과를 이용하여 부착율 산정 방법을 제시
 - ◆ 실험값을 토대로 구한 부착율과 실험실 규모 또는 Pilot 규모의 부상탑에서 얻어진 부착율과의 상관 관계를 도출



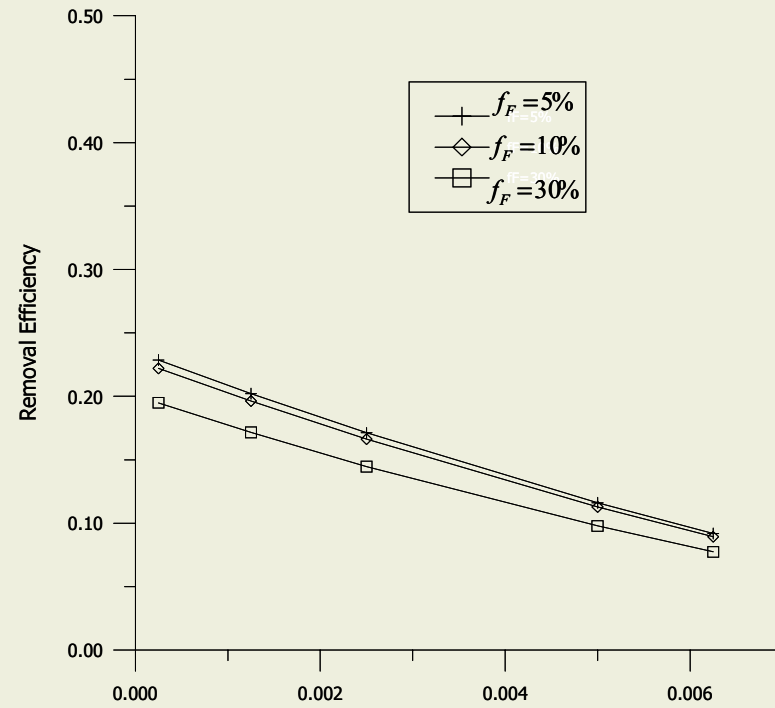
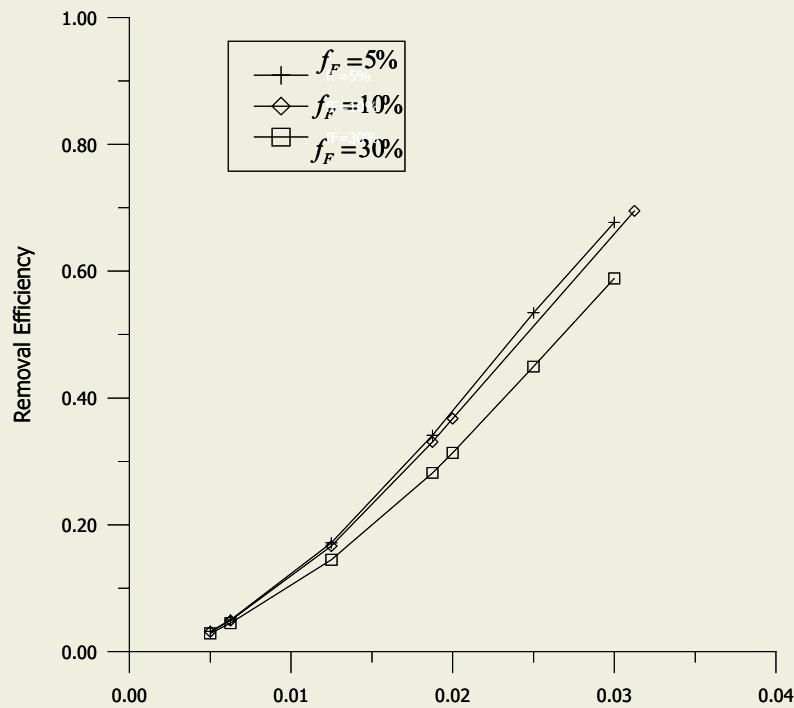
4. 연구수행 내용(계속)

- ◆ Semi-Continuous Hallimond Tube 실험방법의 모색
 - ◆ 연속식 부상탑 실험과 함께 Semi-Continuous Hallimond Tube 실험을 위한 Tube 설계 및 운전 변수 범위 확인을 위한 예비실험과 수정작업 진행중



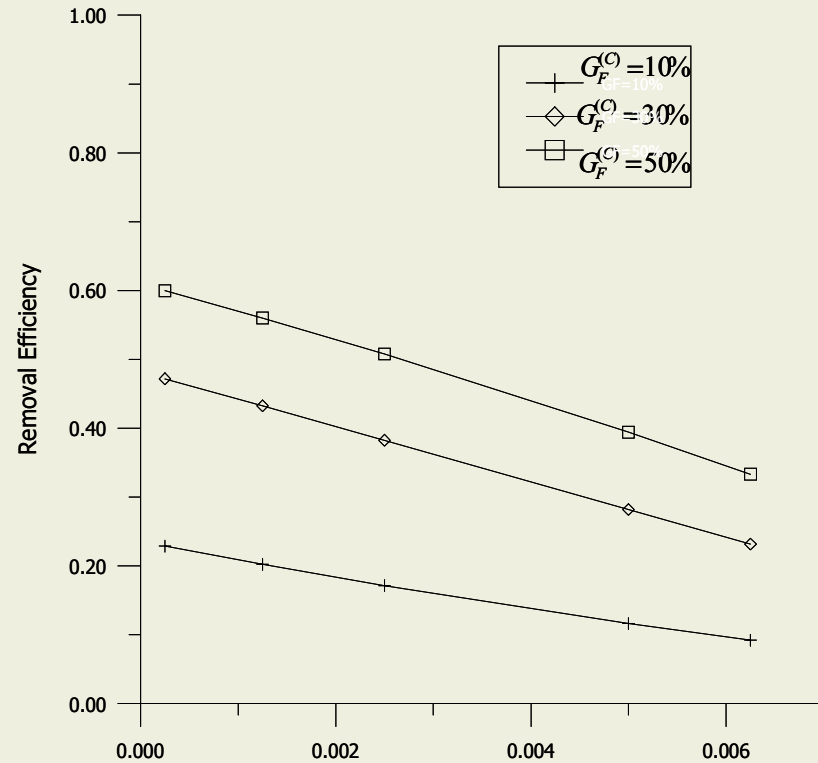
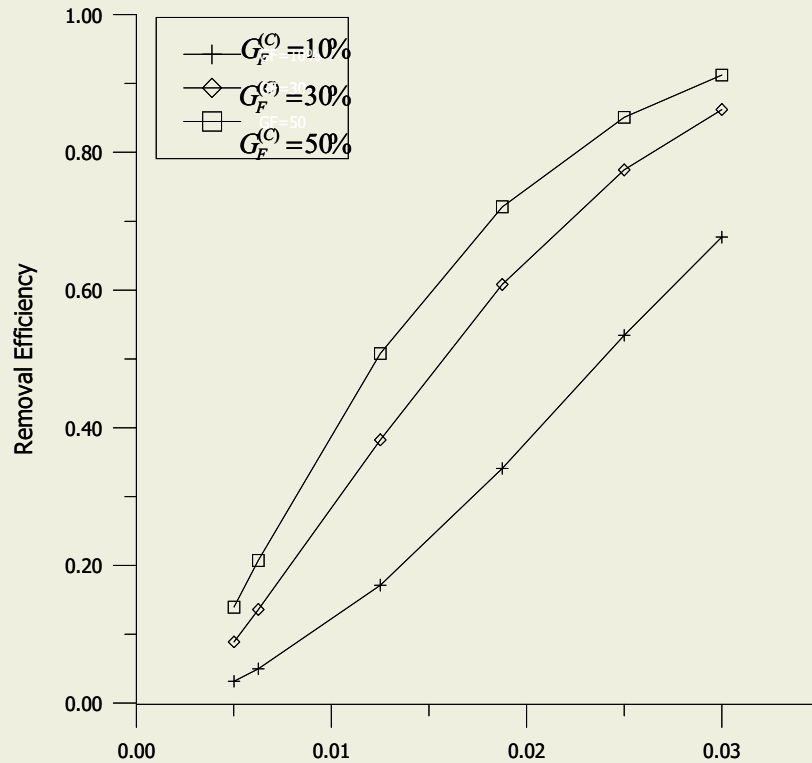
5. 연구개발 결과

운전변수의 부상탑 효율에 대한 민감도 분석 결과



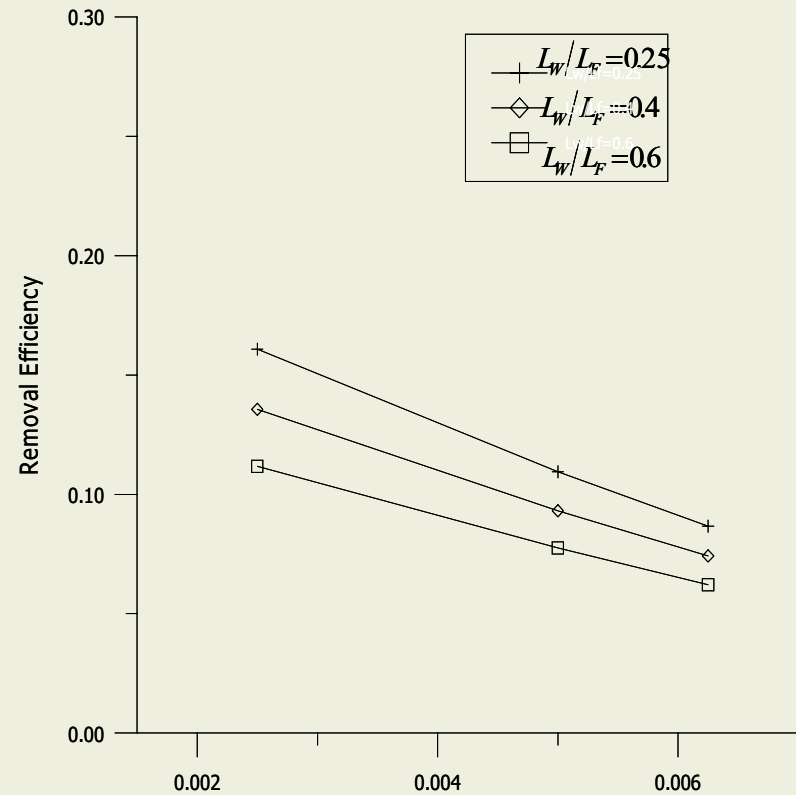
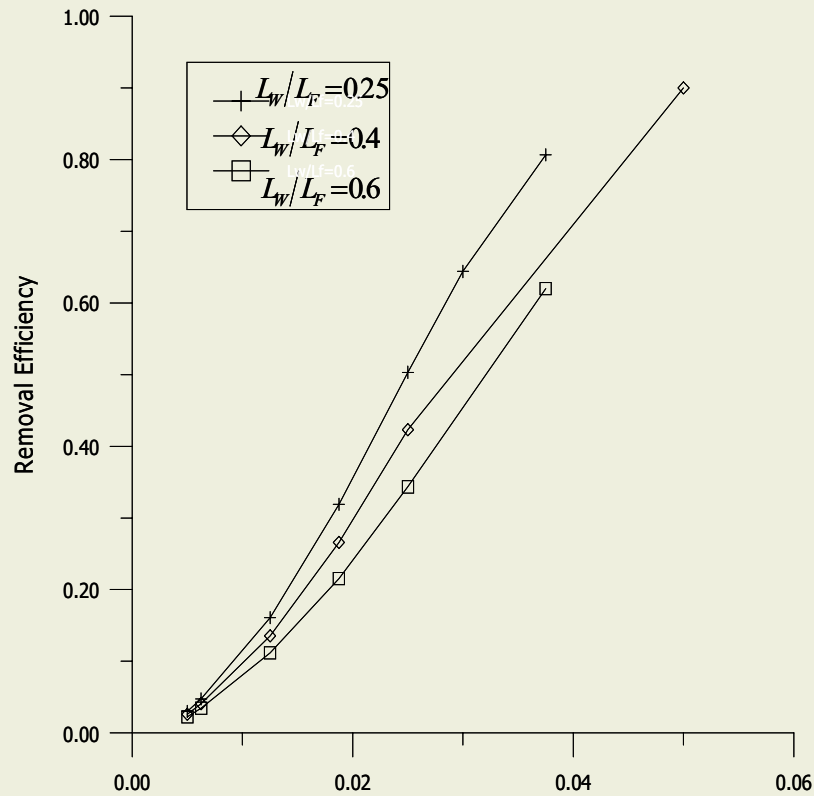
Removal efficiency as a function of (a) $K_1^{(C)*}$ and (b) $K_1^{(S)*}$ for various values of solids concentration in feed

5. 연구개발 결과(계속)



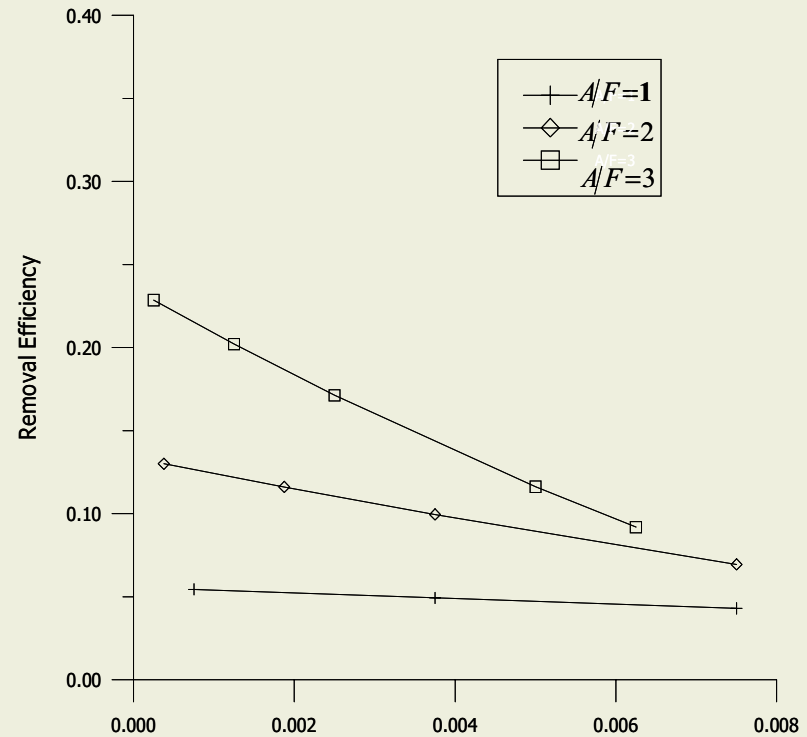
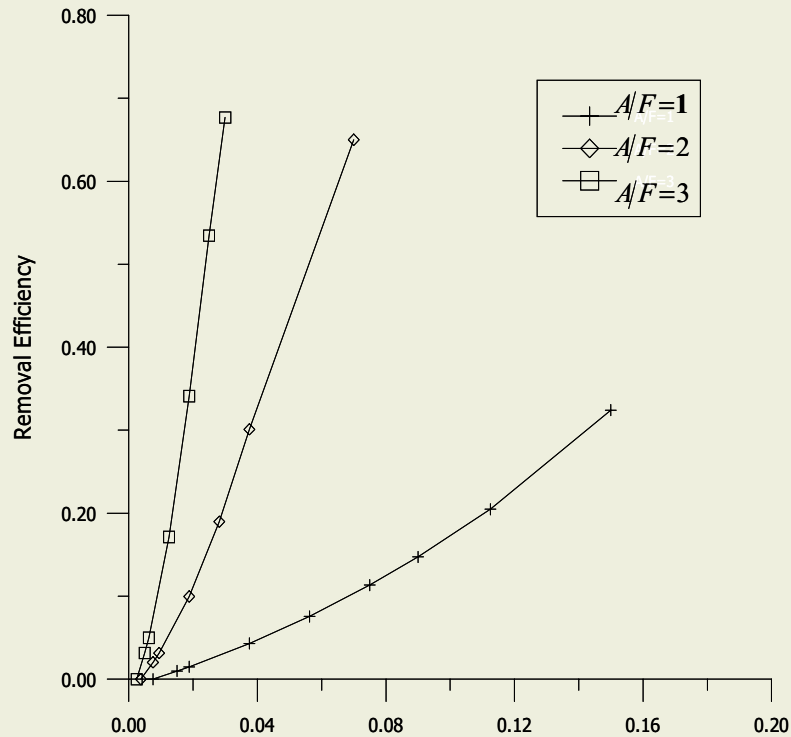
Removal efficiency as a function of (a) $K_1^{(C)*}$ and (b) $K_1^{(S)*}$
for various values of contaminant content in feed

5. 연구개발 결과(계속)



Removal efficiency as a function of (a) $K_1^{(C)*}$ and (b) $K_1^{(S)*}$ for various values of washwater rate

5. 연구개발 결과(계속)

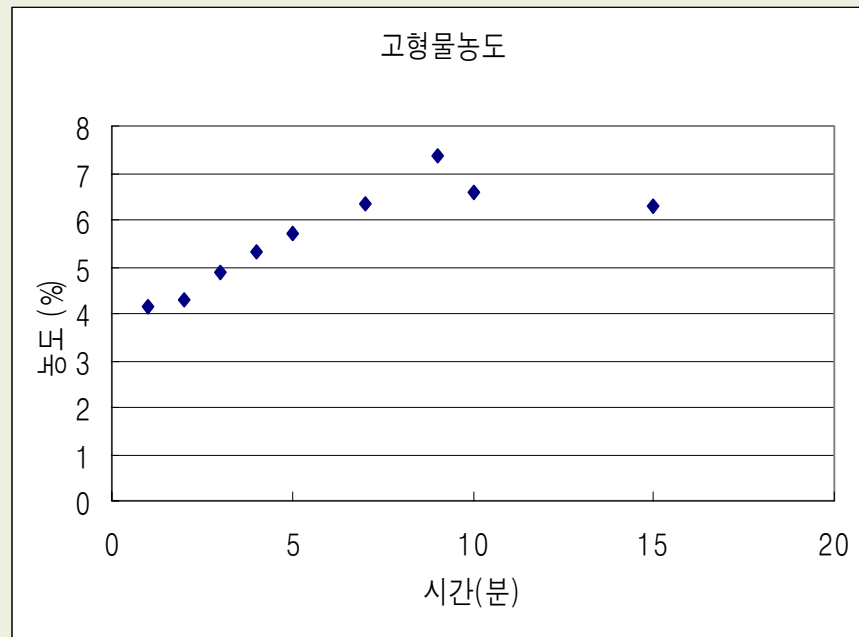


Removal efficiency as a function of (a) $K_1^{(C)*}$ and (b) $K_1^{(S)*}$ for various values of air to feed flowrate

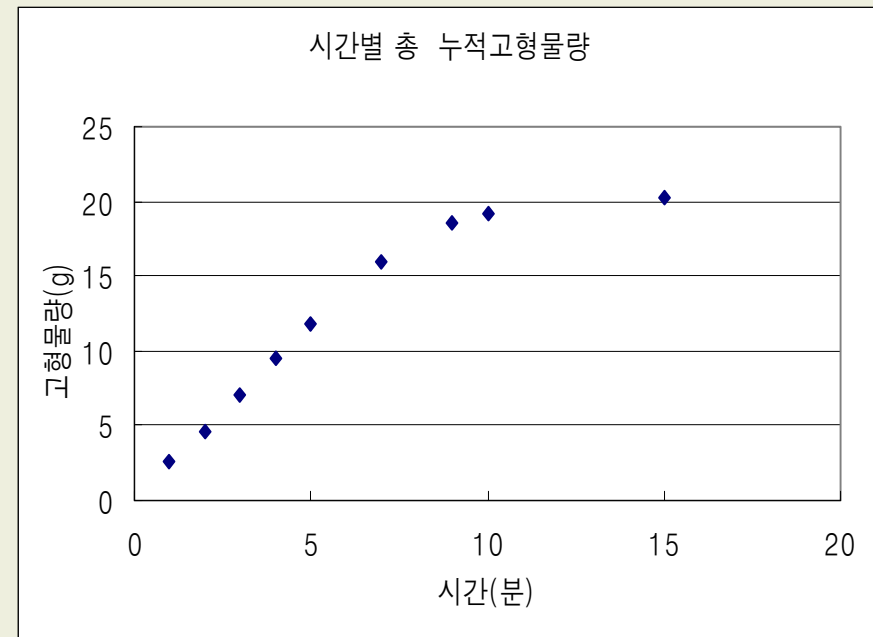
5. 연구개발 결과(계속)

◆ 회분식 Hallimond Tube 실험 결과

◆ 팔당시료를 이용한 회분식 실험 결과



(a) 고형물농도 변화

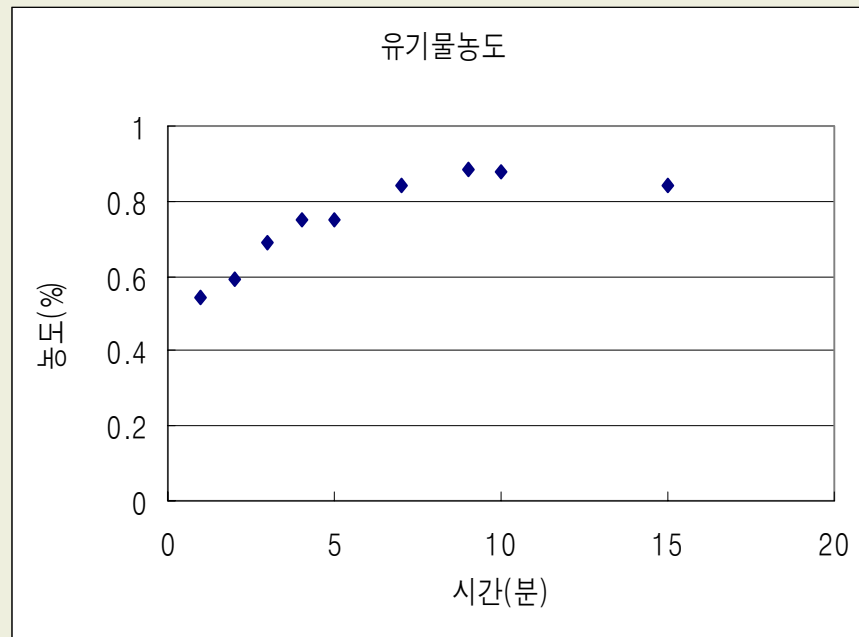


(b) 총 누적고형물량

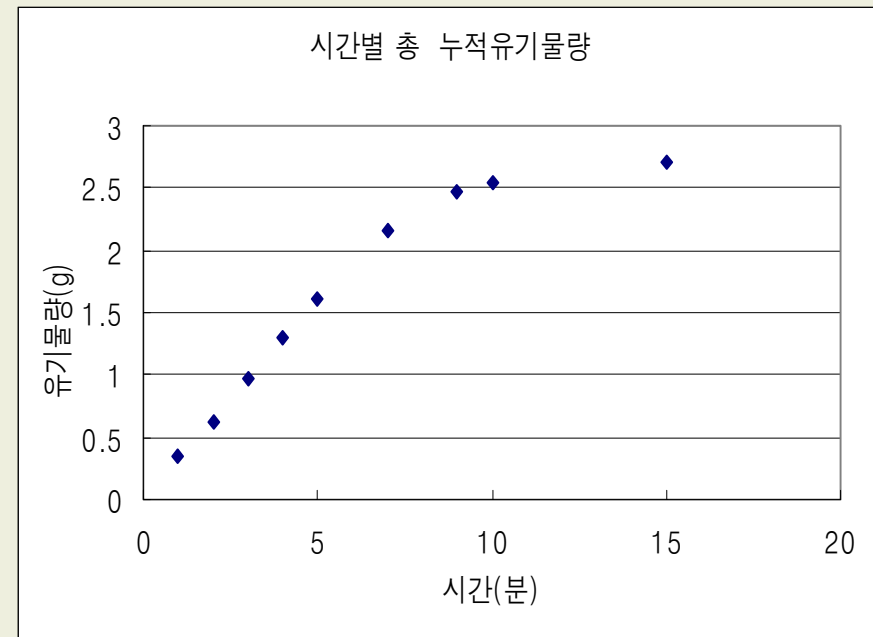
5. 연구개발 결과(계속)

회분식 Hallimond Tube 실험 결과

▶ 팔당시료를 이용한 회분식 실험 결과(계속)



(a) 유기물농도 변화

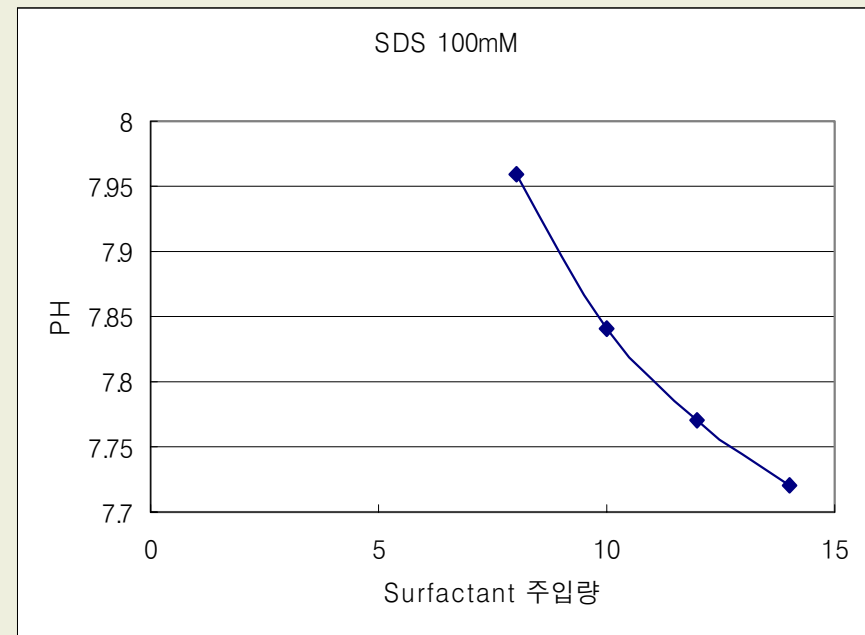
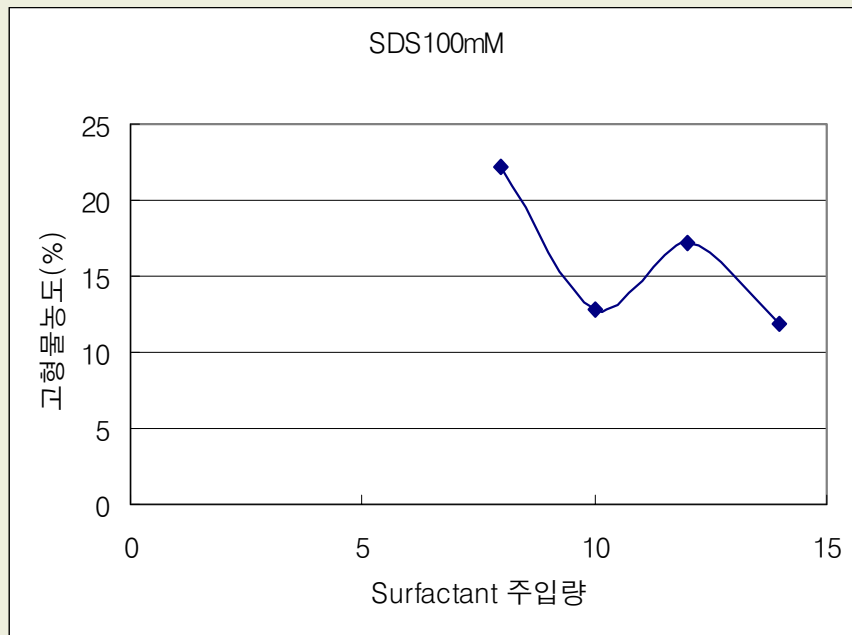


(b) 총 누적유기물량

5. 연구개발 결과(계속)

◆ 회분식 Hallimond Tube 실험 결과

◆ 팔당시료를 이용한 회분식 실험 결과(계속)

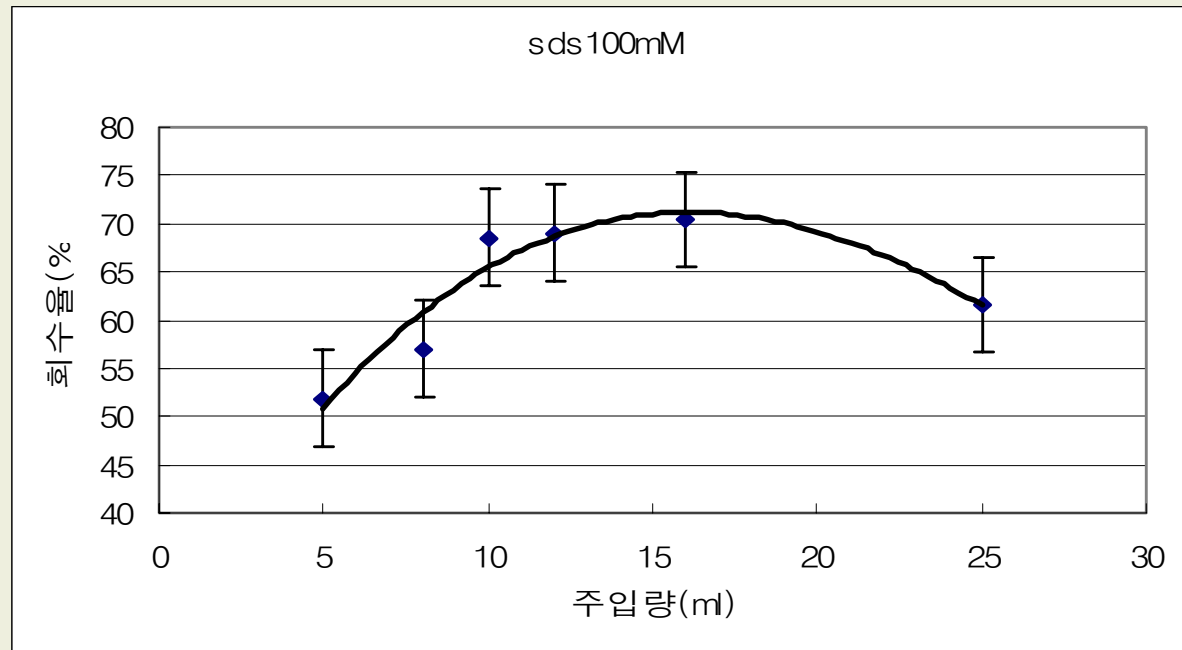


Surfactant 주입량 변화에 따른 (a)고형물농도변화와 (b)pH변화

5. 연구개발 결과(계속)

◆ 회분식 Hallimond Tube 실험 결과

◆ 팔당시료를 이용한 회분식 실험 결과(계속)



Surfactant(SDS 100mM)주입량의 변화에 따른 회수율의 변화

PART 3

퇴적오니의 처리를 위한
생물학적 다단계 슬러리 반
응조 개발

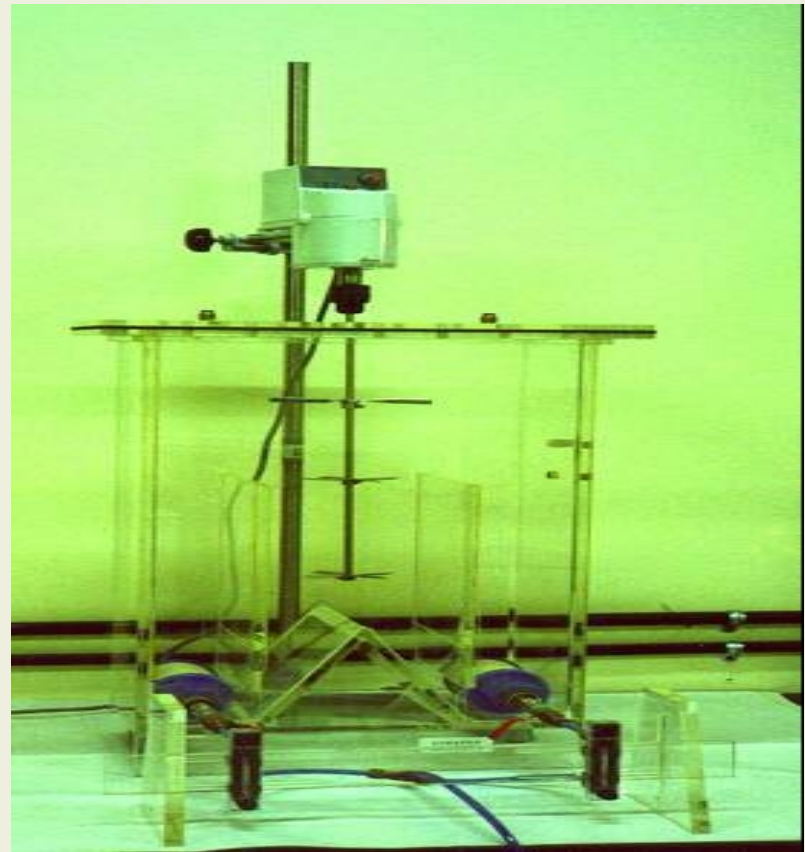
1. Surry reactor의 이론과 구성

◆ Surry reactor의 개요

- 유기성 오염물의 분해 및 독성제거를 위하여 미생물의 생물학적 작용을 이용
- 물질전달율의 향상과 오염원과 미생물의 접촉증가로 오염원을 신속하게 분해할 수 있어 경제적 및 기술적 측면에서 유리
- PAHs 중 naphthalene, phenanthrene에 오염된 토양을 대상으로 오염물질의 제거효율, 휘발물질의 흡착정도 및 미생물의 증식변화를 검토하여 슬러리 반응조 내 여러 가지 변수들에 대한 mechanism을 규명하고자 수행

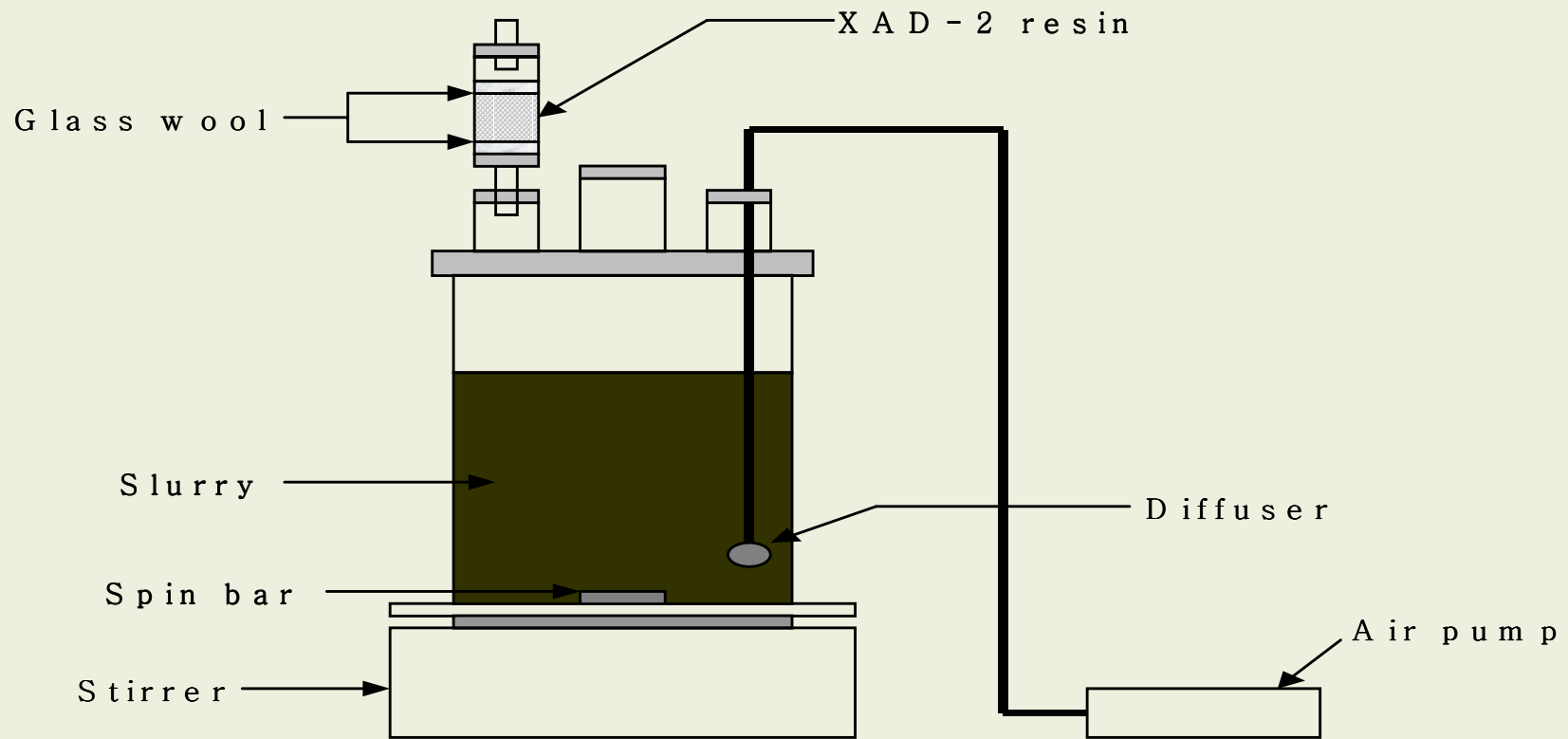
2. Slurry 반응조의 구성

- ◆ 총 용량 : 55L
- ◆ 작업용량 : 36L
- ◆ 반응조 하부 중앙
내부 각도 : 60
- ◆ 상하향로 간
단면적비 : 1.029



3. 실험 장치 및 운전 조건

◆ 실험공정개략도



3. 실험 장치 및 운전 조건

◆ 운전조건

Volume (L) : 1.2

Temperature (°C) : 25 ± 5

Aeration rate (L/min) : 3.5

pH : 7.2

Dissolved Oxygen (mg/L) : >2.0

Total Solid (%) : 10

Nutrient addition :

PAHs microorganism :

3. 실험 장치 및 운전 조건

◆ 실험 방법

< 시료 >

인천 남동공단 우수지 퇴적오니(1) + 팔당호 퇴적오니(1)

< 시료의 전처리 >

습식 체거름법으로 0.177mm의 체를 통과시킨 시료에 naphthalene과 phenanthrene 일정농도를 투여하여 3일 동안 교반 한 뒤 사용

< 반응조 운전기간 >

23일

3. 실험 장치 및 운전 조건

◆ 실험 방법

<식종미생물>

Bushnell-Haas broth, Yeast-Extract 및 Glucose 등을 이용하여 만든 배양액에 계대배양 중인 PAHs 미생물을 접종하여 성장시킨 슬러지를 사용

< 운전기간중 COD 농도 >

고형물 COD_{cr} : 7,081 ~ 12,128mg/L

액상 COD_{cr} : 87 ~ 214mg/L

3. 실험 결과 및 고찰

◆ 시간경과에 따른 PAHs 미생물의 증식변화

<운전개시시>

naphthalene, phenanthrene 모두 높은 분해 미생물 수(>10¹¹g⁻¹ soil)

<3일후까지>

토양에 흡착된 오염원의 급속 제거로 인해 급속한 미생물 증식(>10¹⁴g⁻¹ soil)

<3일후부터 7일까지>

급속한 감소

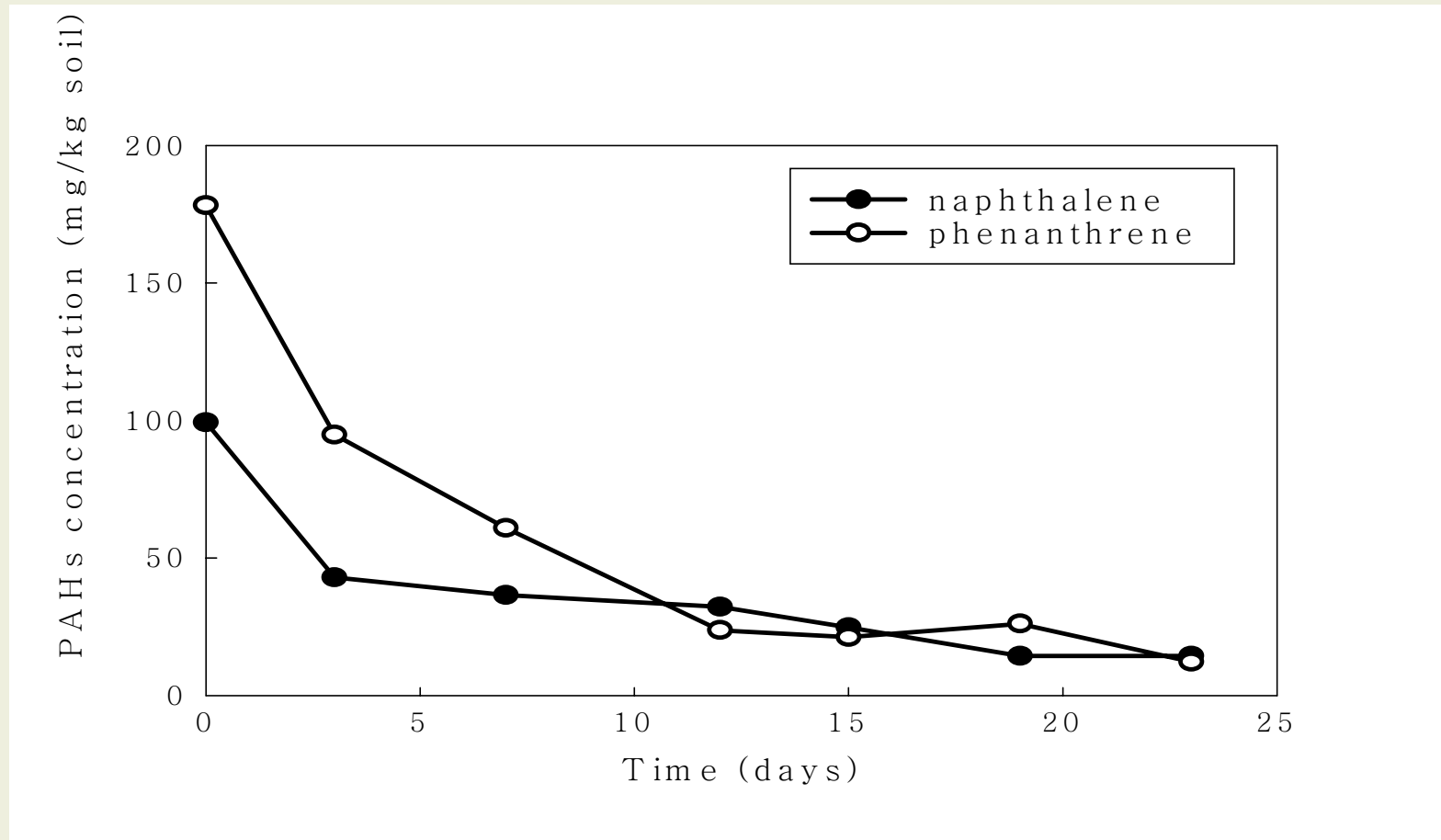
< 운전완료시까지 >

완만 혹은 일정한 미생물 수(10¹¹ ~ 10¹²g⁻¹ soil)

3. 실험 결과 및 고찰

◆ PAHs 제거 효율 (23일 이내)

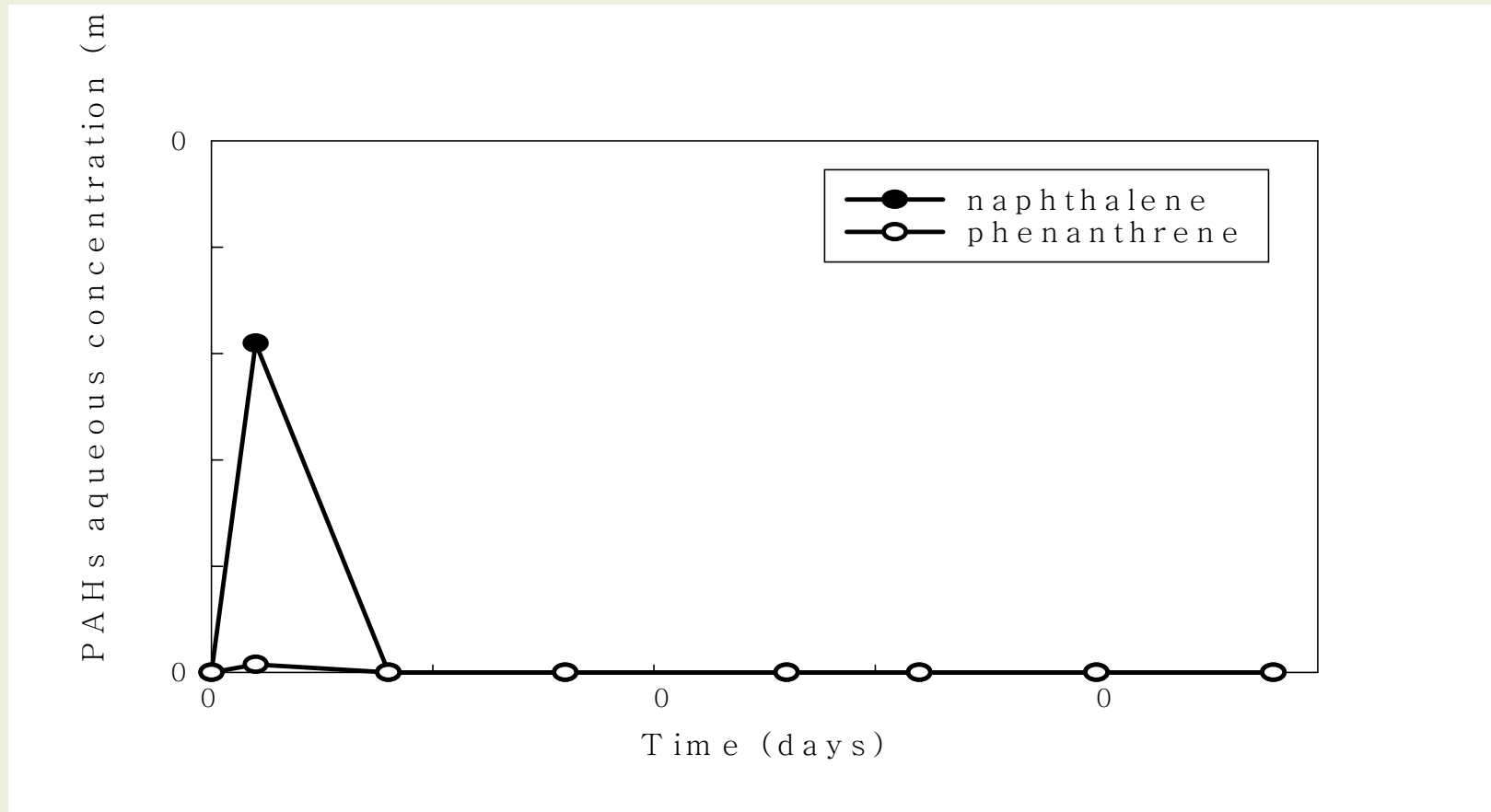
naphthalene : $82.7 \pm 2.9\%$, phenanthrene : $92.6 \pm 0.5\%$



3. 실험 결과 및 고찰

◆ PAHs중 액상내 농도 변화

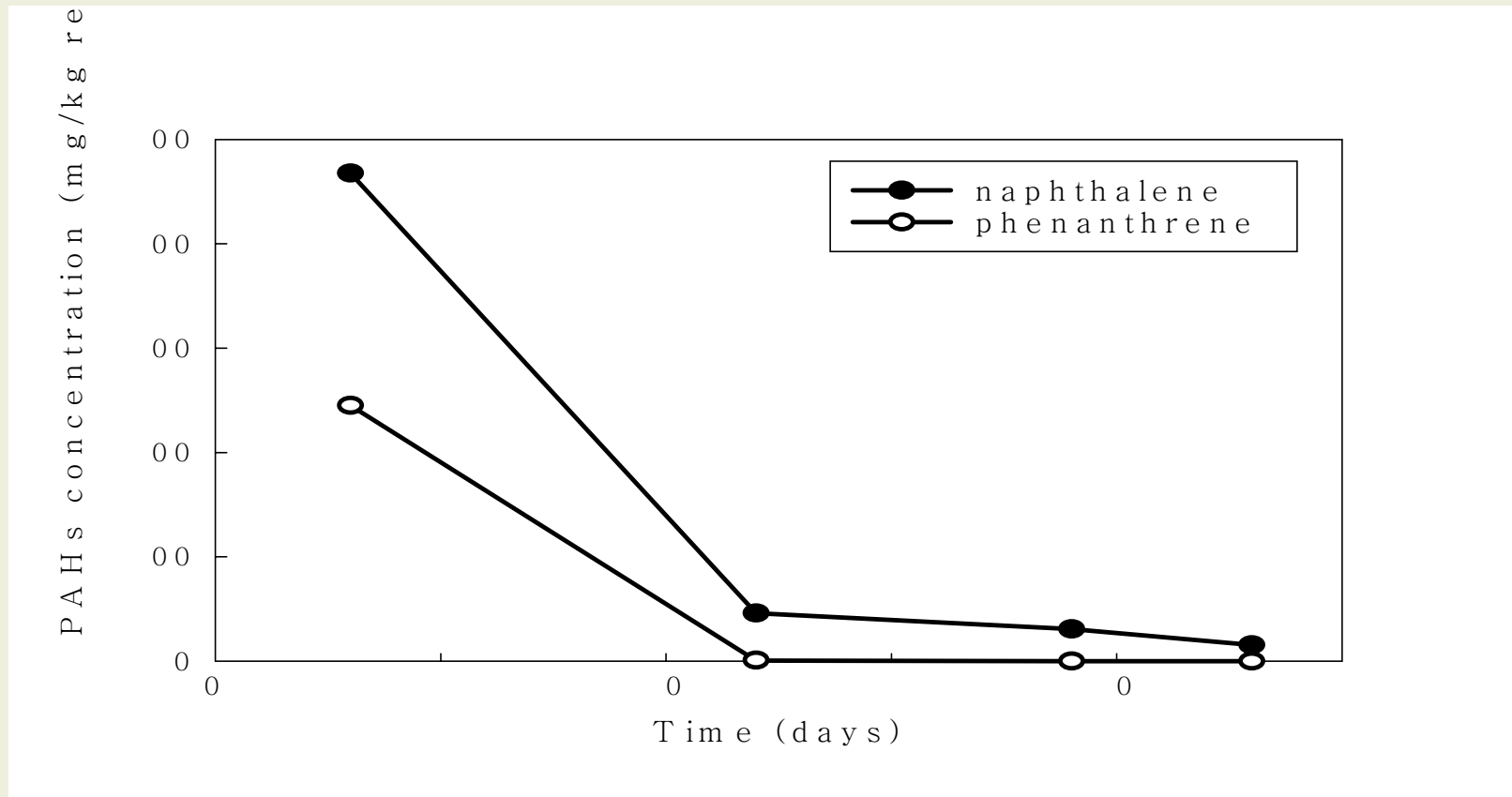
3일 이후 모두 검출되지 않았고 각 PAHs 용해도(naphthalene : 32mg/L, phenanthrene : 1.18mg/L)보다 낮게 유지되었으며 초기에 증가하다가 감소하는 경향을 보임.



3. 실험 결과 및 고찰

◆ XAD 컬럼내 흡착된 PAHs 측정 결과

운전개시 3일 후 naphthalene은 초기 오염농도의 40%정도가 흡착되었고, phenanthrene은 21%가 흡착되었으며, 그 후 운전 완료까지 10.5%, 0.5%가 각각 흡착되어 반응초기에 PAHs 화합물의 대부분이 흡착을 알 수 있음.



3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ 물질수지(mass balance)
 - 초기오염농도와 시간경과에 따른 오염원 농도변화와 휘발정도를 측정하여 파악.
 - 생분해도(biodegradation)는 이 차이에 의해 계산
 - 그 결과 슬러리 반응조 운전기간 중 naphthalene은 휘발도>생분해도>고형물흡착 순의 크기로 나타났으며, phenanthrene은 생분해도> 고형물 흡착>휘발도의 순을 보였다.

Compound	Feed	Fate Mechanism (% Distribution)		
	mg/kg	Biodegradation	Sorption	Volatilization
Naphthalene	1167	28	21.5	50.5
Phenanthrene	1167	43	35.5	21.5

3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ PAHs 분해미생물의 계면활성제 영향
 - PAHs에 대한 분해효율을 높이기 위해 사용
 - 유기화합물의 용해도를 높이고 표면장력을 감소시켜 미생물의 접근을 용이하게 함
 - 비이온계 계면활성제인 Tween 80(Aldrich□)을 이용
 - Tween 80은 naphthalene 미생물 성장에 저해제 역할을 함
 - Tween 80은 phenanthrene 미생물 성장에 촉매제의 역할을 하지 못함

3. 실험 결과 및 고찰

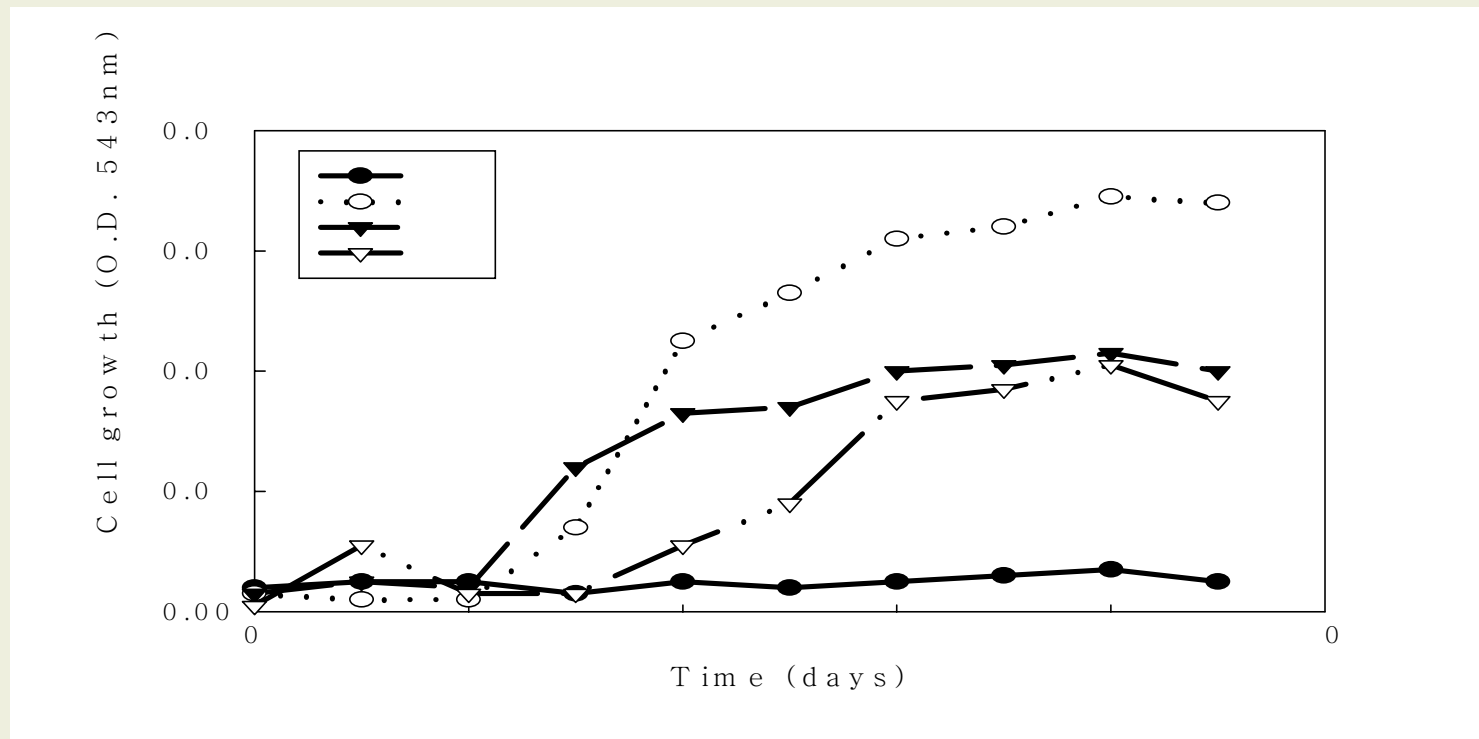
◆ 계면 활성제 실험 조건 및 특성

Batch culture conditions and maximum growth values in presence of the PAHs				
Symbol	Compound	Microorganism	Surfactant (Tween 80)	Biomass maximum value (O.D.)
NC	naphthalene	-	-	0.007
N1	naphthalene	naphthalene	-	0.069
N2	naphthalene	naphthalene	1/2 CMC	0.043
N3	naphthalene	naphthalene	CMC	0.041
PC	phenanthrene	-	-	0.006
P1	phenanthrene	phenanthrene	-	0.069
P2	phenanthrene	phenanthrene	1/2 CMC	0.058
P3	phenanthrene	phenanthrene	CMC	0.053

Carbon source concentration : 100mg/L

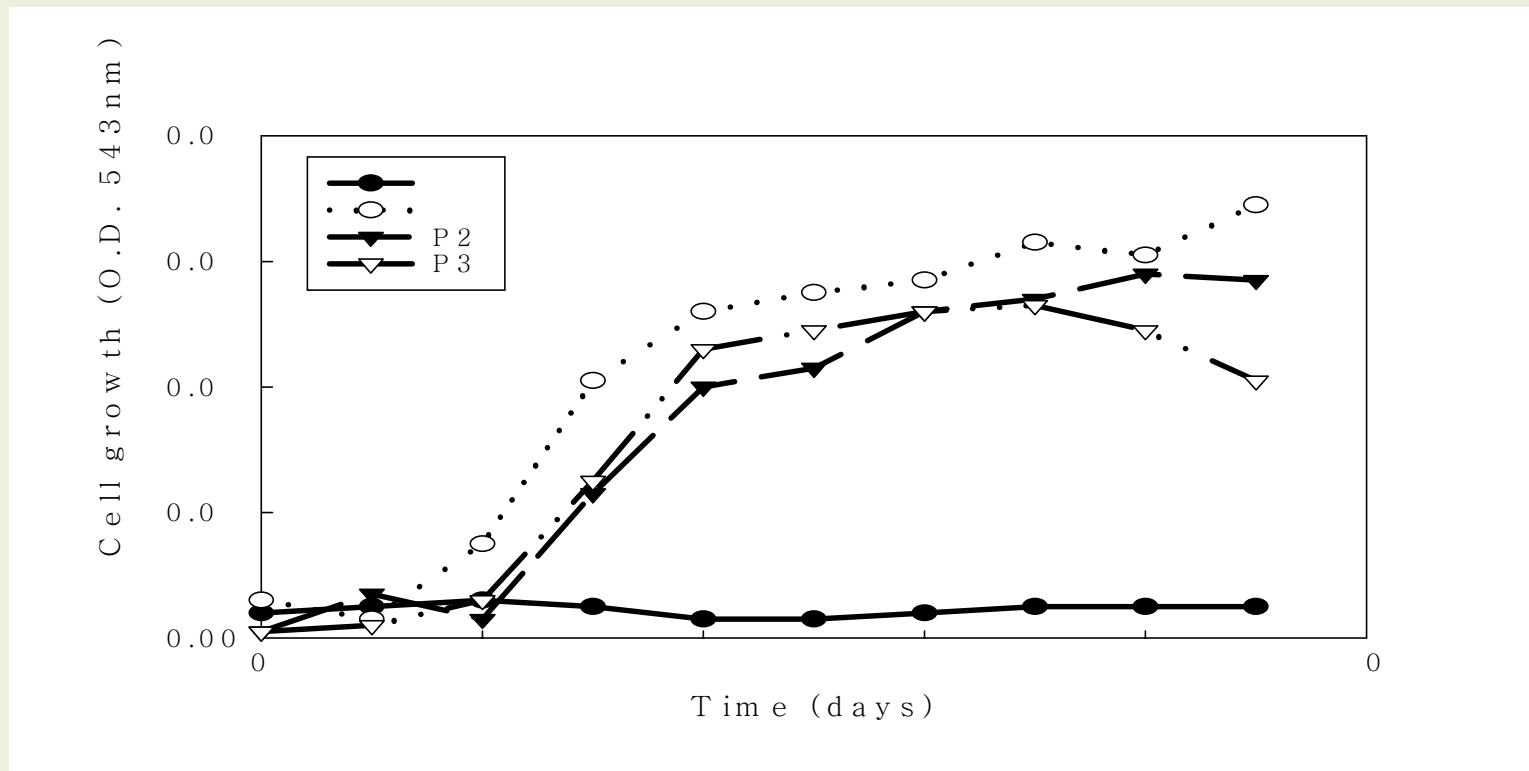
3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ Naphthalene 미생물과 계면 활성제 Tween 80
 - Control(blank bottle)을 제외한 모든 반응조에서 3~4일 경과 후부터 분해가 시작
 - naphthalene 미생물만 첨가된 반응조가 계면활성제를 투입한 반응조에 비해 매우 우수한 분해효율을 나타냄



3. 실험 결과 및 고찰

- ◆ Phenanthrene 미생물과 계면 활성제 Tween 80
 - Control(blank bottle)을 제외한 모든 반응조에서 2~3일 경과 후부터 분해가 시작
 - Phenanthrene 미생물만 첨가된 반응조가 계면활성제를 투입한 반응조에 비해 우수한 분해효율을 나타냄



PART IV

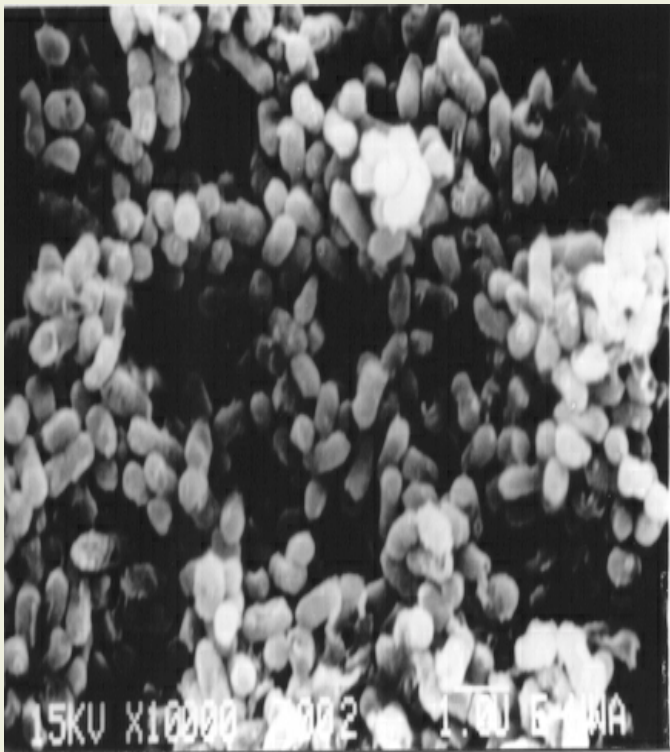
퇴적오니의 생물학적 중금속

제거 기술 및 미생물 제제 개발

1. 퇴적 오니의 생물학적 중금속
제거 기술 개발을 위한
기초 설계 인자 도출

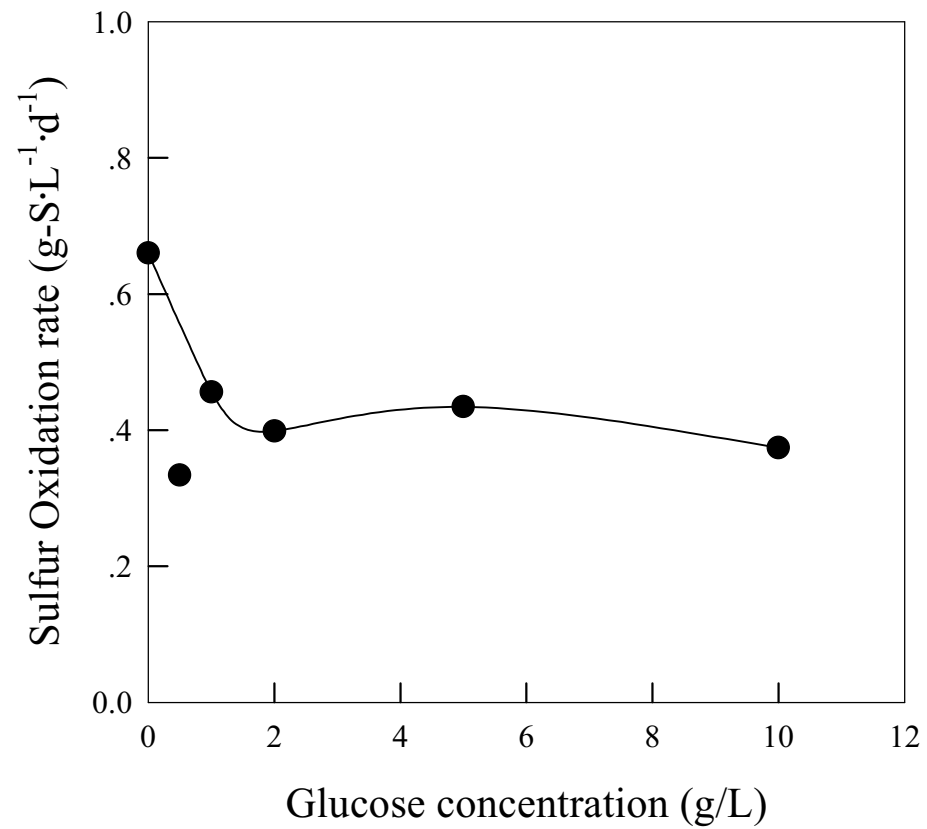
최적 황산화세균의 선정 및 생리적 특성 조사

중금속 용출능이 우수한 *Thiobacillus thiooxidans* AZ11

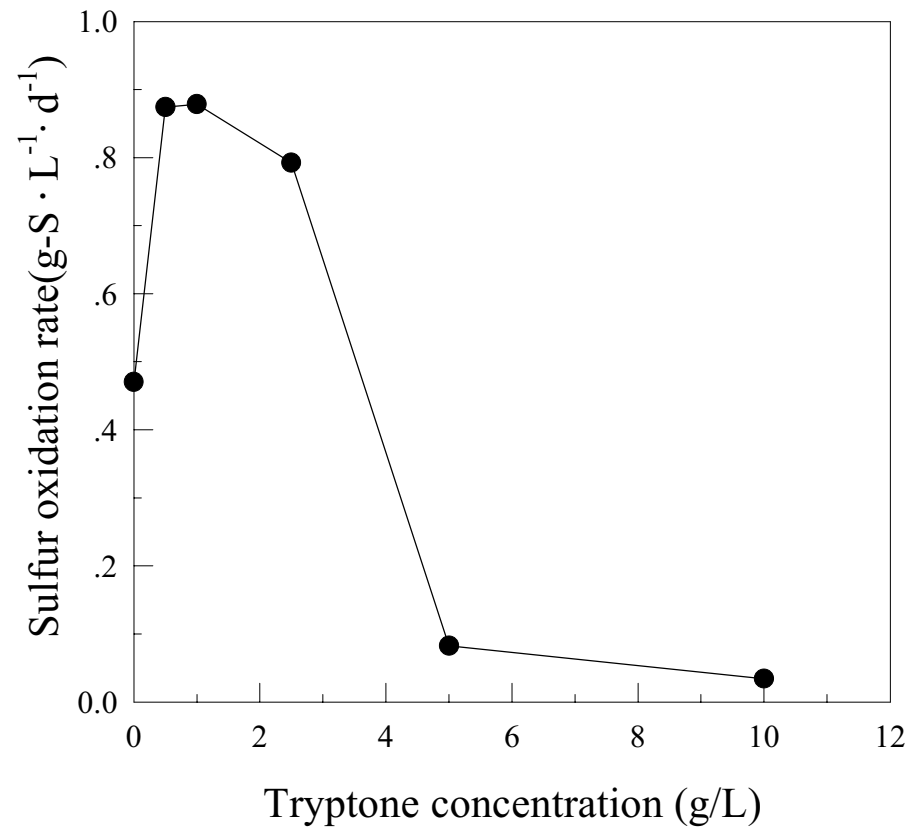


Items	Characteristics
Isolation source	Anaerobically digested sludge
Colony on MW-agar plate	Whitish-yellow with sulfur deposited 1-1.5mm in diameter
Morphology	Short rod, 0.5x1-1.5
Motility	Positive
Gram-staining	Negative
Intracellular sulfur	Negative
Autotrophic growth with	
Hydrogen sulfide	Positive
Elemental sulfur	Positive
Thiosulfate	Positive
Tetrathionate	Positive
Heterotrophic growth	Negative
Ferrous ion oxidation	Negative
Nitrate respiration	Negative
Quinone	Ubiquinone-8
Major cellular fatty acid	Non-hydroxy 16:00 Hydroxy 3-OH 14:00

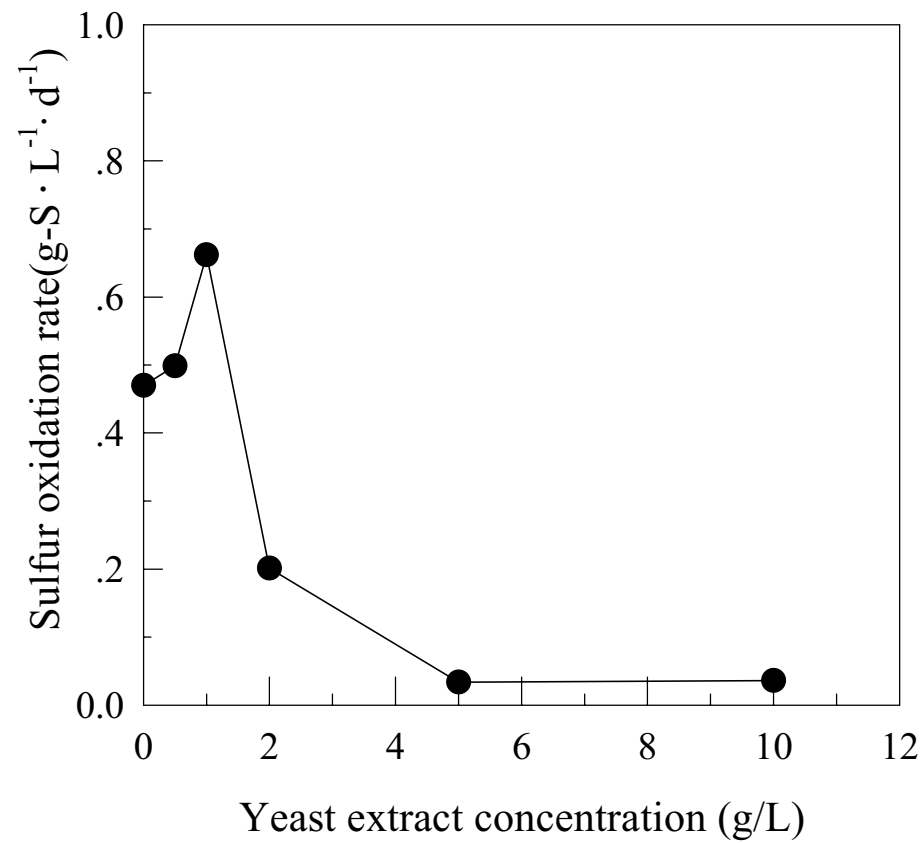
Thiobacillus thiooxidans AZ11의 황산화 속도
에 미치는 glucose 농도의 영향



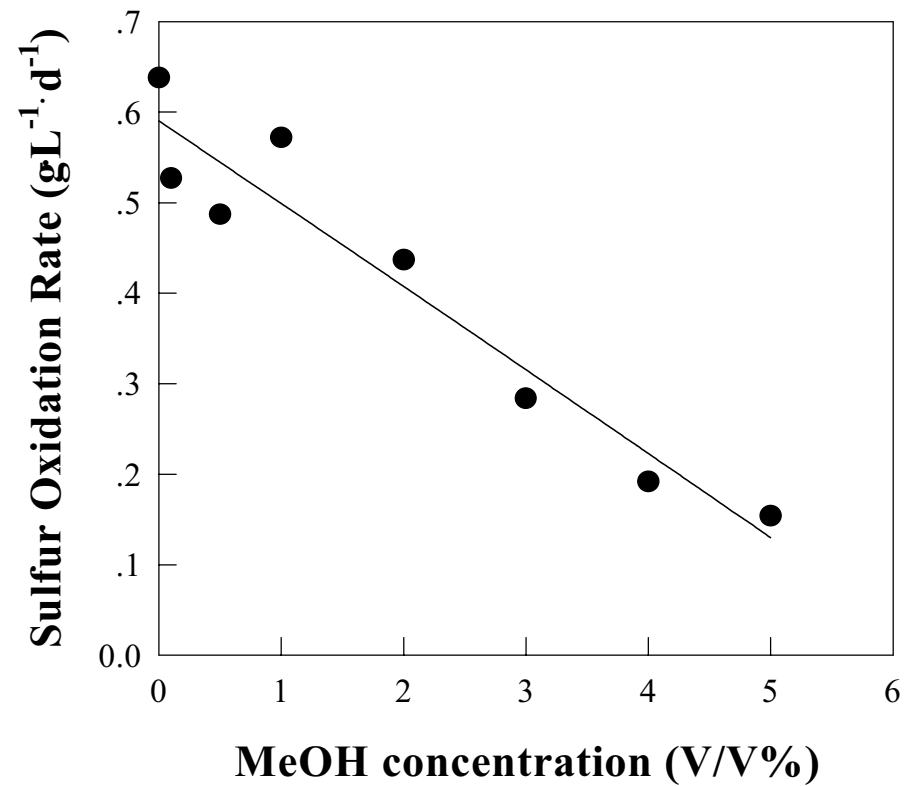
Thiobacillus thiooxidans AZ11의 황산화 속도
에 미치는 tryptone 농도의 영향



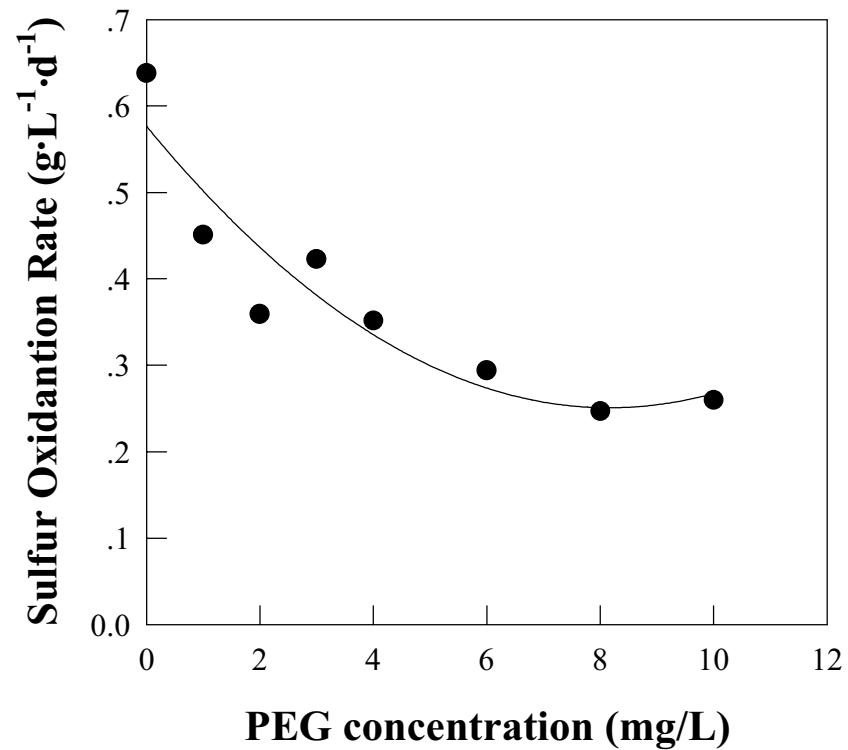
Thiobacillus thiooxidans AZ11의 황산화 속도
에 미치는 yeast extract 농도의 영향



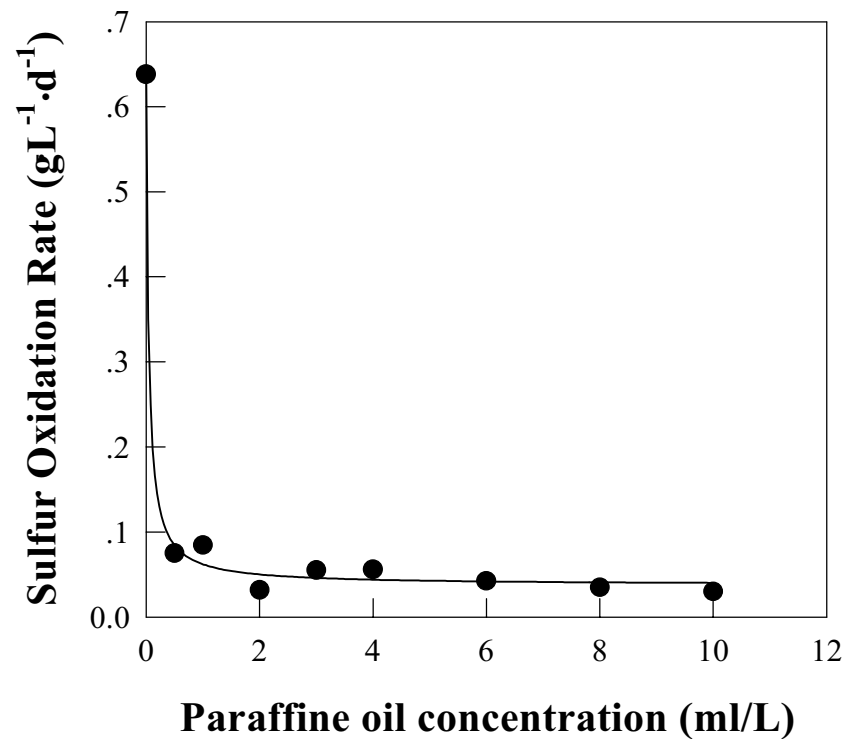
Thiobacillus thiooxidans AZ11의 황산화 속도에 미치는 Methanol 농도의 영향



Thiobacillus thiooxidans AZ11의 황산화 속도에 미치는 PEG 농도의 영향



Thiobacillus thiooxidans AZ11의 황산화 속도
도에 미치는 Paraffin oil 농도의 영향



Thiobacillus thiooxidans AZ11의 황산화 속도
에 미치는 surfactant 첨가 영향

농도 (ml/L)	평균 황산화속도 (g-S·L ⁻¹ ·d ⁻¹)		
	Surfactant1	Surfactant 2	Surfactant 3
Control	0.200	0.200	0.200
0.5	0.060	0.076	0.217
1.5	0.057	0.114	0.221
2.5	0.025	0.084	0.220
3.5	0.024	0.120	0.188
4.5	0.032	0.139	0.168
5.5	0.004	0.110	0.117

2. 플라스크 배양 방법을 통한
퇴적오니의 중금속 제거 효율에
미치는 제반인자의 영향 조사

운전변수의 영향 조사 실험 (1)

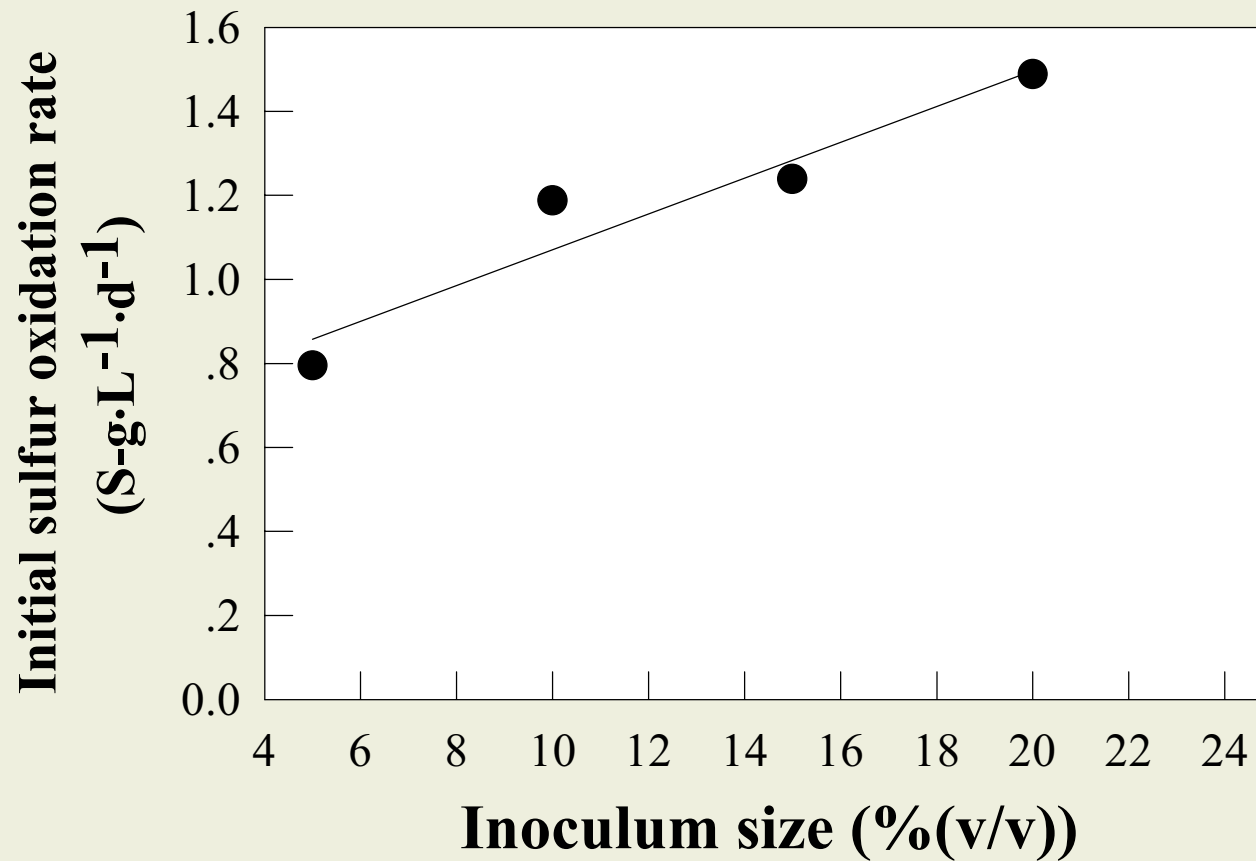
- ◆ *Thiobacillus thiooxidans* AZ11 접종농도의 영향
- ◆ 기질(S⁰) 첨가량 영향
- ◆ 초기 pH의 영향
- ◆ 통기량의 영향
- ◆ 고형물 농도의 영향

실험(1)에 사용된 시료(인천 준설 오니)중의 중금속 농도

중금속	Zn	Cu	Pb	Cd	Cr
농도 (mg/kg)	3860 ±58	3535 ±263	625 ±54	19 ±2	1345 ±146

중금속 제거 효율에 미치는 *Thiobacillus thiooxidans* AZ11 접종농도의 영향

시료 : 인천 준설 오니



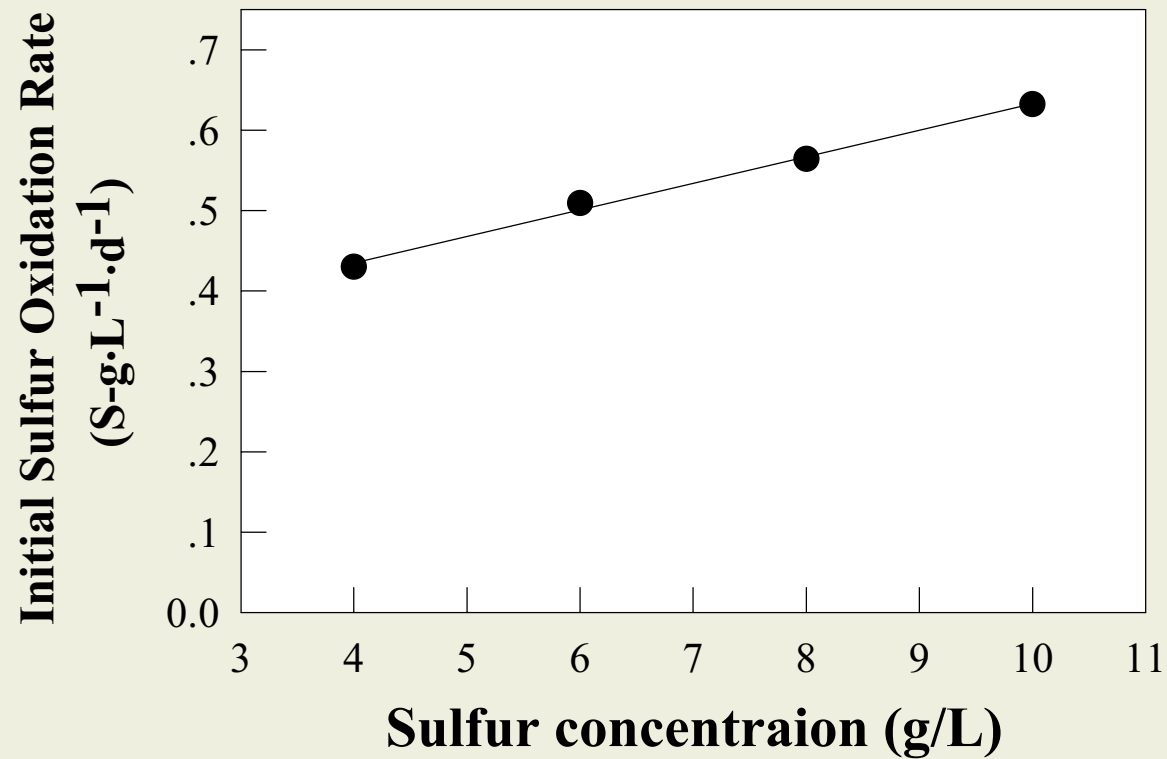
접종 농도에 따른 중금속 용출효율 (고형물 농도 : 200g/L)

시료 : 인천 준설 오니

접종농도 (v/v %)	중금속 제거효율(%)		
	Zn	Cu	Cr
5%	95	44	47
10%	99	47	43
15%	99	51	53
20%	99	49	58

중금속 제거 효율에 미치는 기질 첨가량 (S^0)의 영향

시료 : 인천 준설 오니



기질(S^0) 농도에 따른 중금속 용출 효율

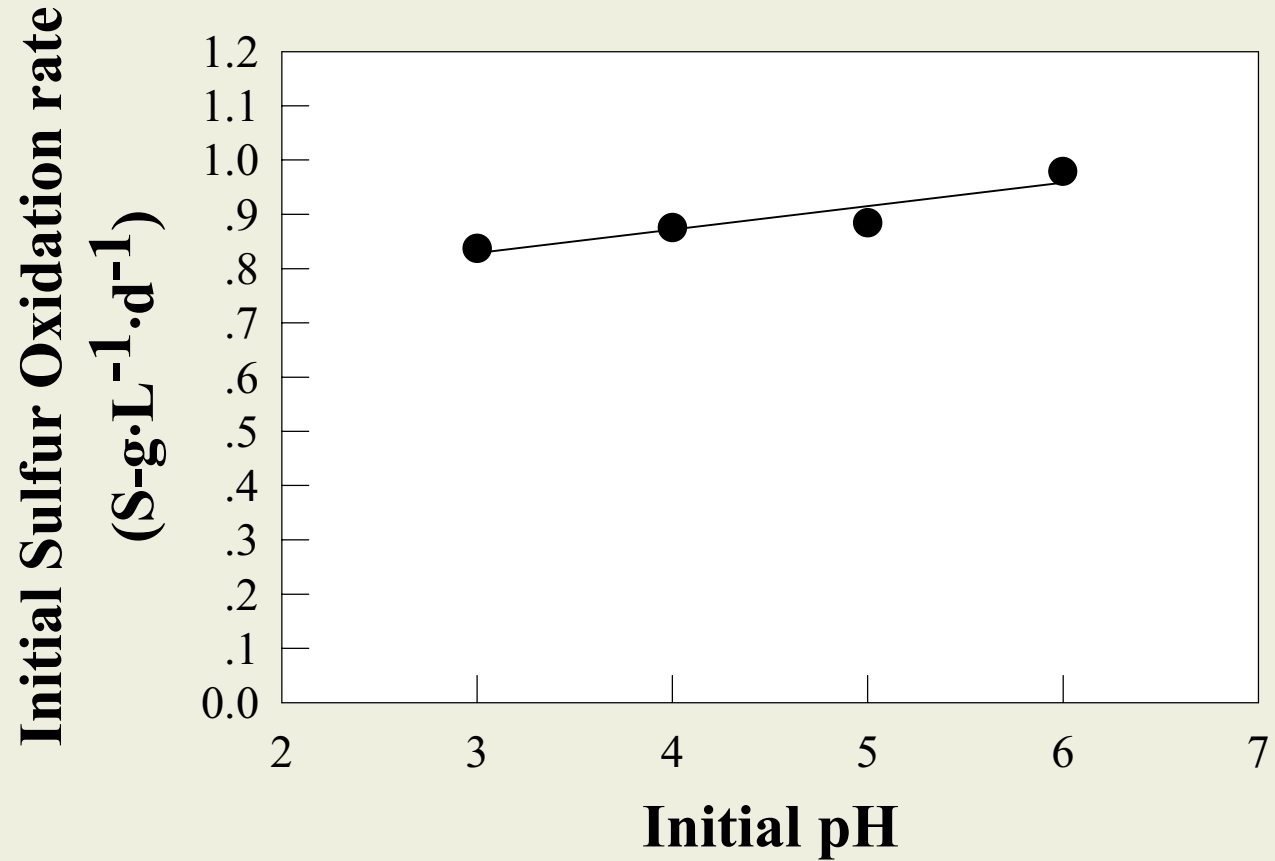
(고형물 농도 ; 200g/L)

시료 : 인천 준설 오니

S^0 (g/L)	중금속 제거효율(%)		
	Zn	Cu	Cr
4	99	50	5
6	99	51	20
8	99	50	33
10	99	49	43

중금속 제거효율에 미치는 초기 pH의 영향

시료 : 인천 준설 오니



초기 pH 에 따른 중금속 용출 효율

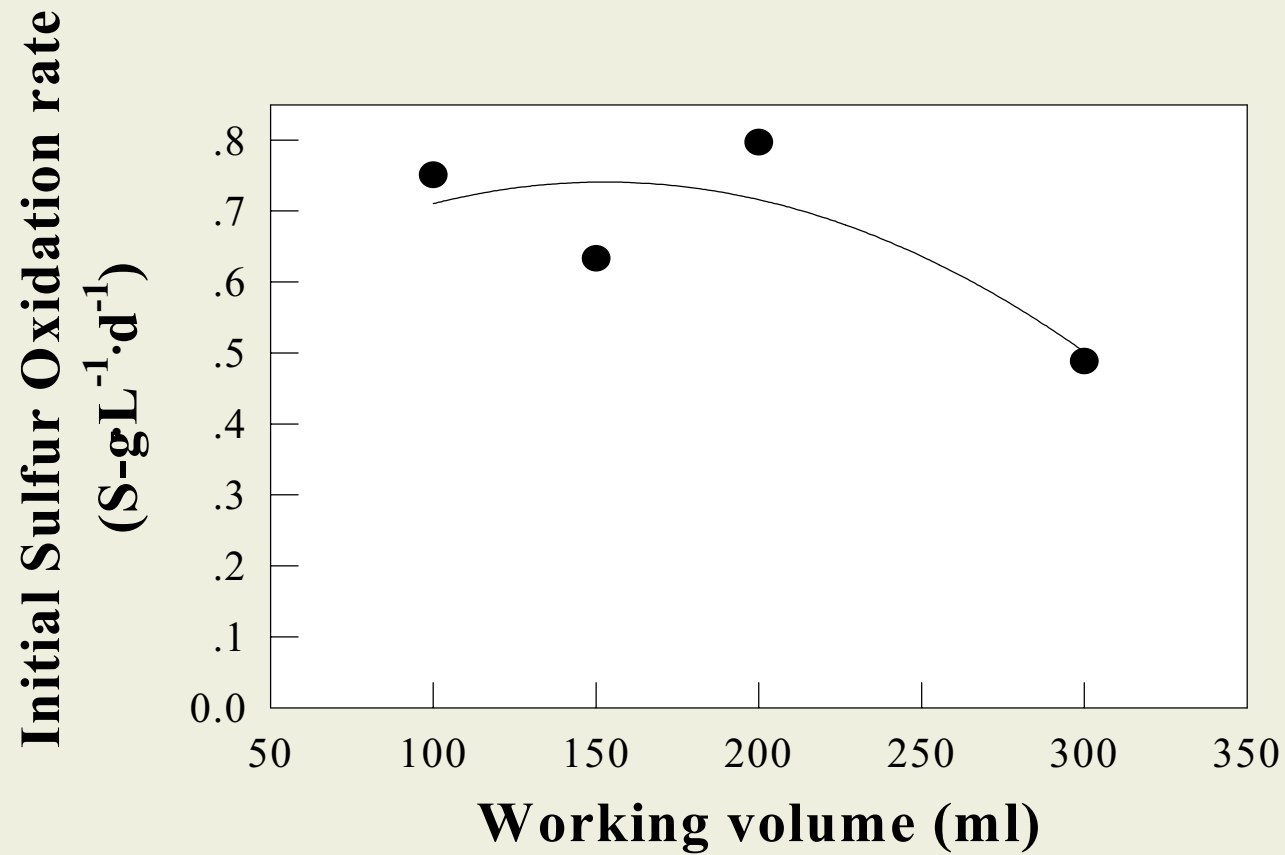
(고형물 농도 ; 200 g/L)

시료 : 인천 준설 오니

pH	중금속 제거효율(%)		
	Zn	Cu	Cr
3	99	50	58
4	97	51	57
5	95	50	45
6	90	33	43

중금속 제거효율에 미치는 통기량의 영향

시료 : 인천 준설 오니



통기량에 따른 중금속 용출 효율

(고형물 농도 ; 200 g/L)

시료 : 인천 준설 오니

반응부피(ml)	중금속 제거효율(%)		
	Zn	Cu	Cr
150	99	33	58
200	99	41	57
250	99	45	49
300	92	38	36

고형물 농도에 따른 중금속 제거 효율 (1)

시료 : 인천 준설 오니

고형물농도 (g/L)	중금속 제거 효율 (%)		
	Zn	Cu	Cr
50	99	82	63
100	94	69	99
200	53	52	84

고형물 농도에 따른 중금속 용출 효율 (2)

시료 : 인천 준설 오니

고형물농도 (g/L)	중금속 제거효율(%)				
	Zn	Cu	Cr	Pb	Cd
100(a)	100	40.3	42	100	100
100(b)	100	47	39	100	95
200	68	47	25	34	55
300	50	24	10	5	30

(a) : 0.5 vvm

(b) : 1 vvm

운전변수의 영향 조사 실험 (2)

- ◆ 초기 pH의 영향
- ◆ 고형물 농도의 영향
- ◆ 기질(S^0) 첨가량 영향

실험(2)에 사용된 시료 중의 중금속 농도

중금속	Zn	Cu	Cr	Cd	Ni
농도 ($\mu\text{g/g}$)	1905	1016	389	14	276

운전변수별 중금속 제거효율 비교 (처리기간 : 7일)

운전변수		중금속 제거 효율 (%)				
		Zn	Cu	Cr	Cd	Ni
초기 pH	4	100	100	95.9	100	100
	5	95.89	100	93.0	100	92.5
	6	91.64	83.0	34.5	94.4	59.9
	7	91.64	83.7	14.8	100	70.1
고형물 농도 (g/L)	90	100	100	85.3	100	100
	180	100	100	18.8	91.9	95.5
	270	100	69.3	6.6	64.6	71.6
	360	76.1	40.6	0.8	41.0	57.6
기질(S ⁰) 첨가량 (g/L)	2	93.1	41.2	0.9	67.0	78.6
	4	100	100	22.1	100	100
	6	100	100	46.7	100	100
	8	100	100	68.4	100	100
	10	100	100	82.8	100	100

3. 생물반응기를 이용한 중금속 제거 실험

생물반응기를 이용한 중금속 제거 실험 조건

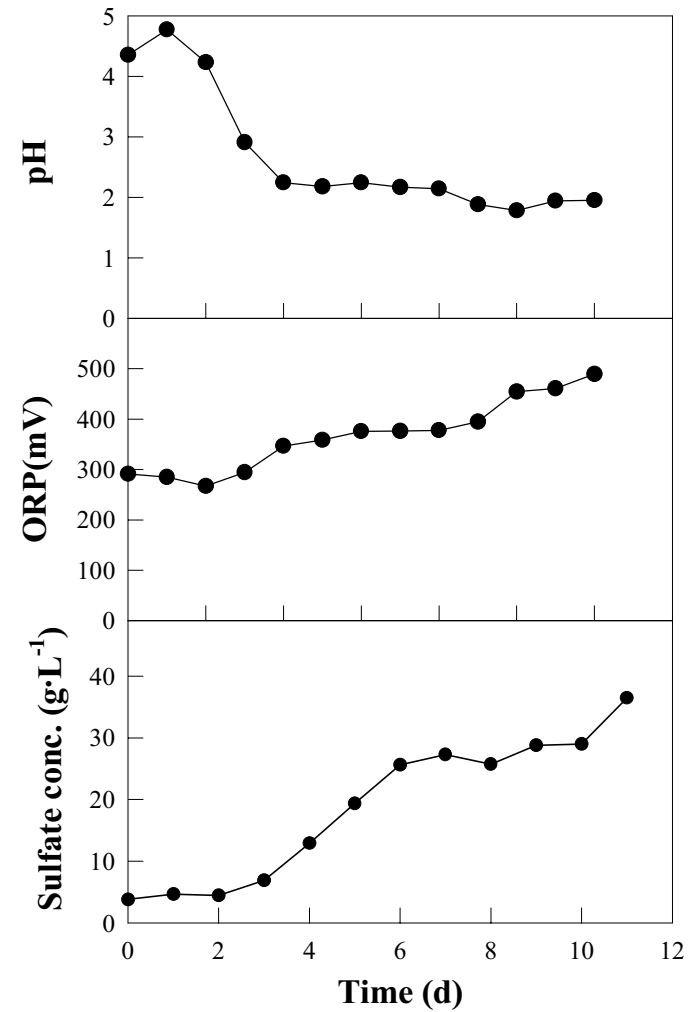
오니 중의 중금속 농도

중금속	Zn	Cu	Cd
농도($\mu\text{g/g}$)	1476	909	8

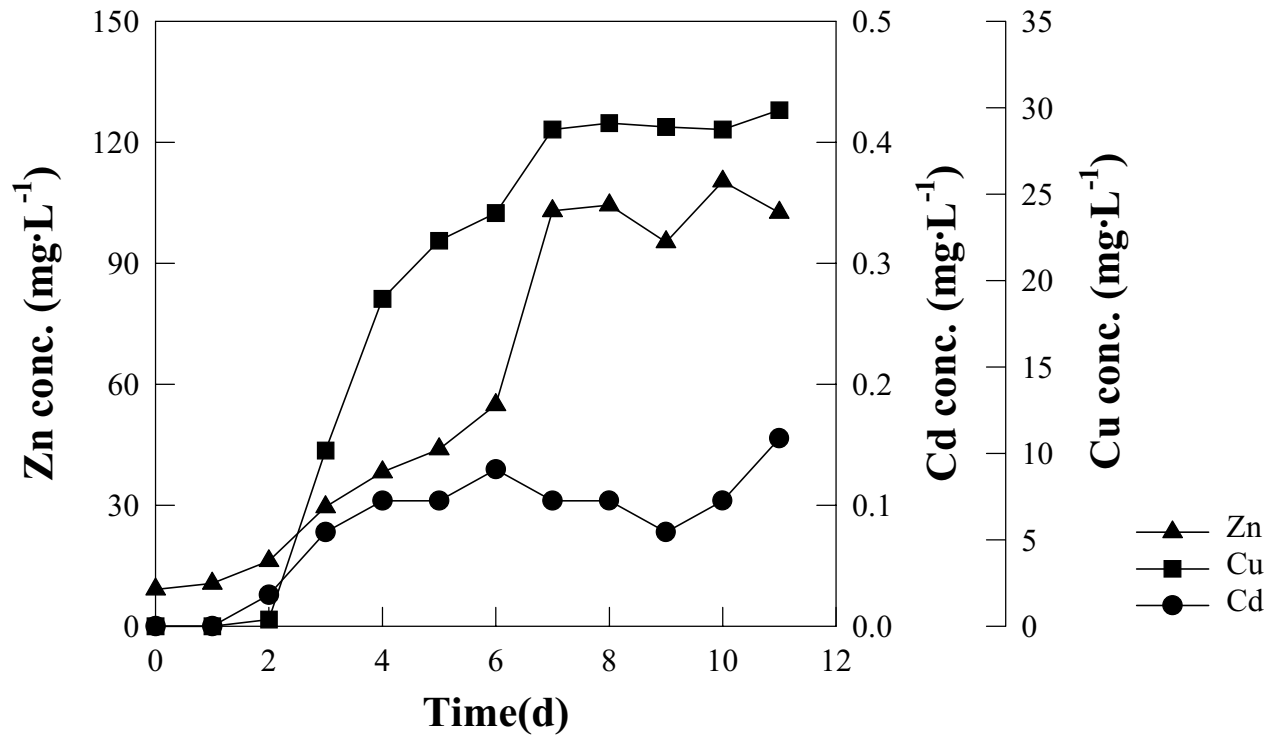
운전 조건

Working Vol. (L)	35
고형물농도(g/L)	100
온도 ($^{\circ}\text{C}$)	30
접종 균주 및 접종	<i>T.thiooxidans</i> AZ11, 10% (v/v)
S ⁰ 첨가 ^량 (g/L)	10

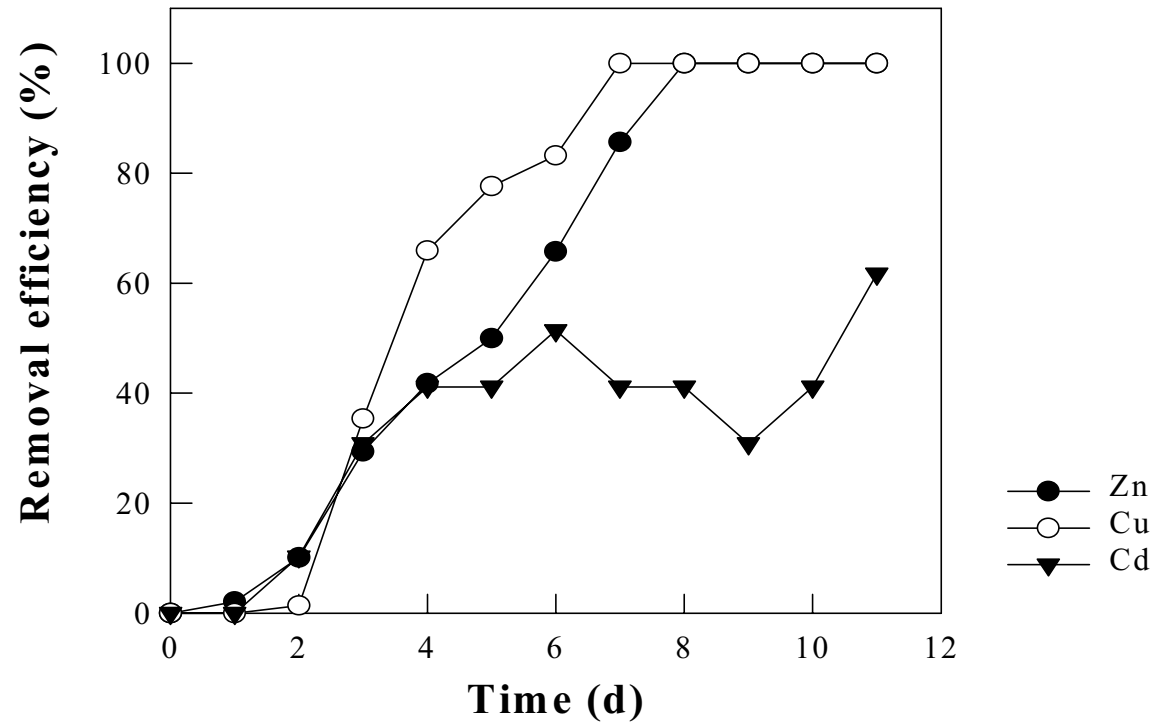
처리 시간에 따른 오니
용액의 pH, ORP,
sulfate 농도의 변화



처리 시간에 따른 용출된 중금속 농도의 변화



처리 시간에 따른 중금속 용출 효율의 변화



4. 처리 오니의 중화방법 및 폐수 중의 중금속 제거 방법 개발

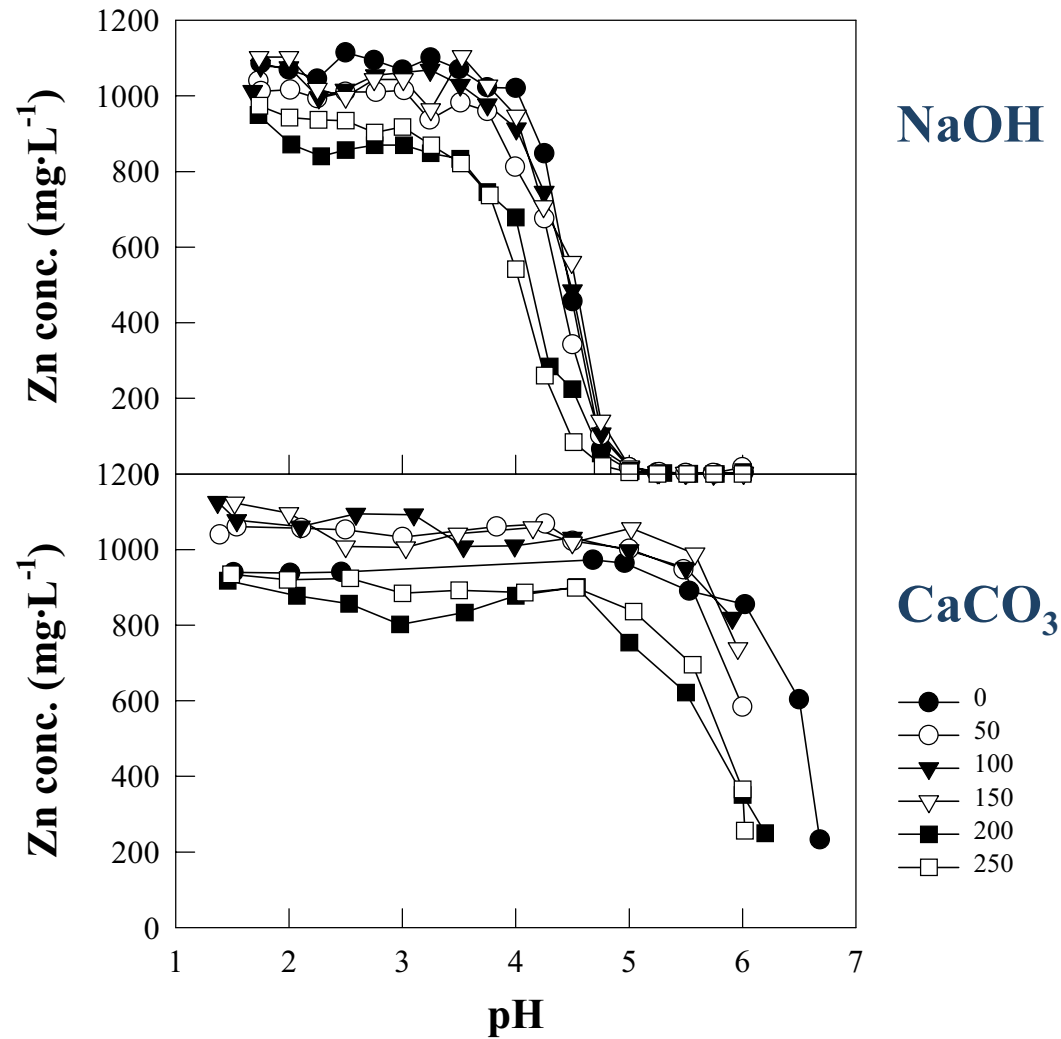
처리 오니의 중화 및 폐수 중의 중금속 제거 실험 방법

- 준설 오니 4L를 5L 비이커에 주입
- 황산용액 첨가하여 pH 1.5로 조절, 48 시간 교반
- 원심분리한 후, 상등액 회수
- 상등액에 중금속 인공 오염
- NaOH 와 CaCO_3 를 이용하여 pH를 0.5 씩 증가시킴

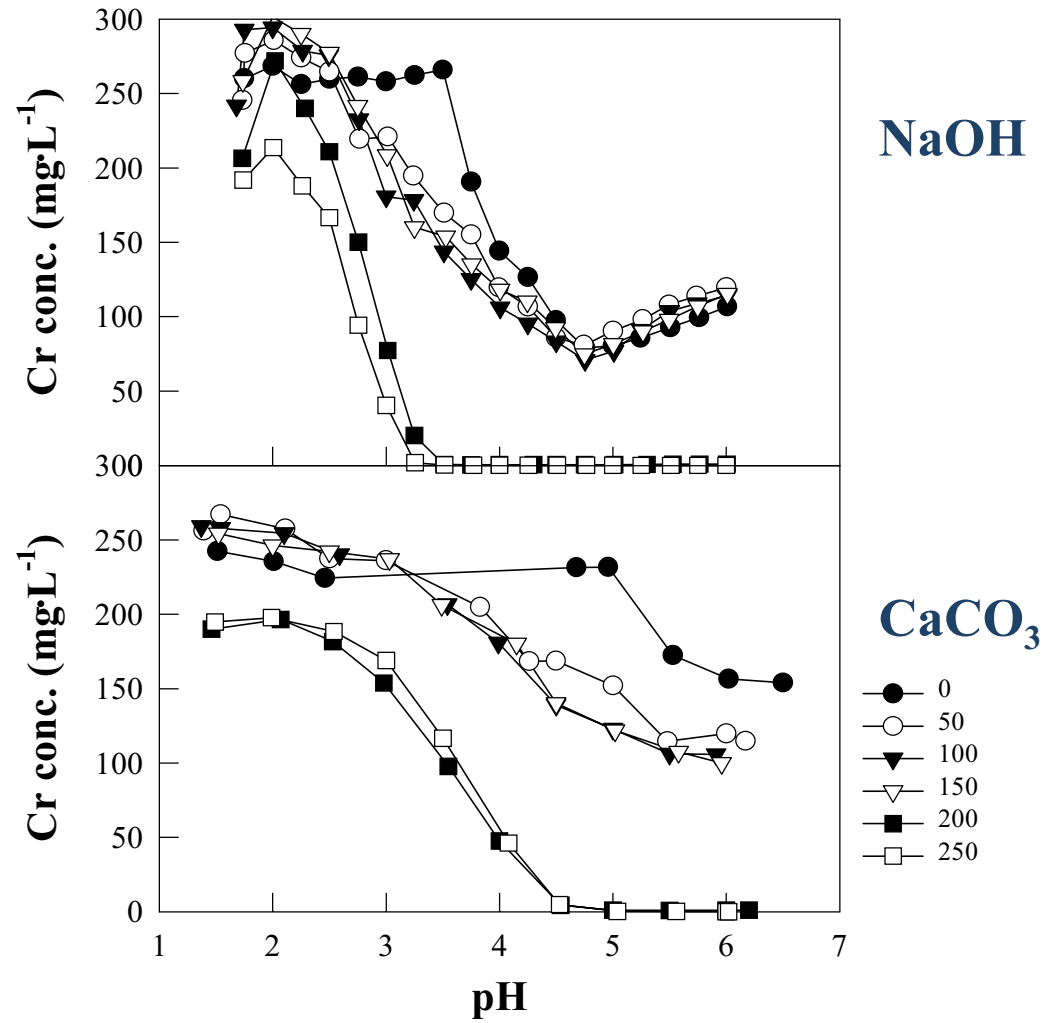
오니 상등액에 첨가한 중금속 농도

사용시약	농도 (mg/L)	사용시약	농도 (mg/L)
ZnSO_4	1000 – Zn	CdSO_4	100 – Cd
CuSO_4	500 – Cu	K_2CrO_7	200 – Cr
PbSO_4	100 – Pb	NiSO_4	100 – Ni

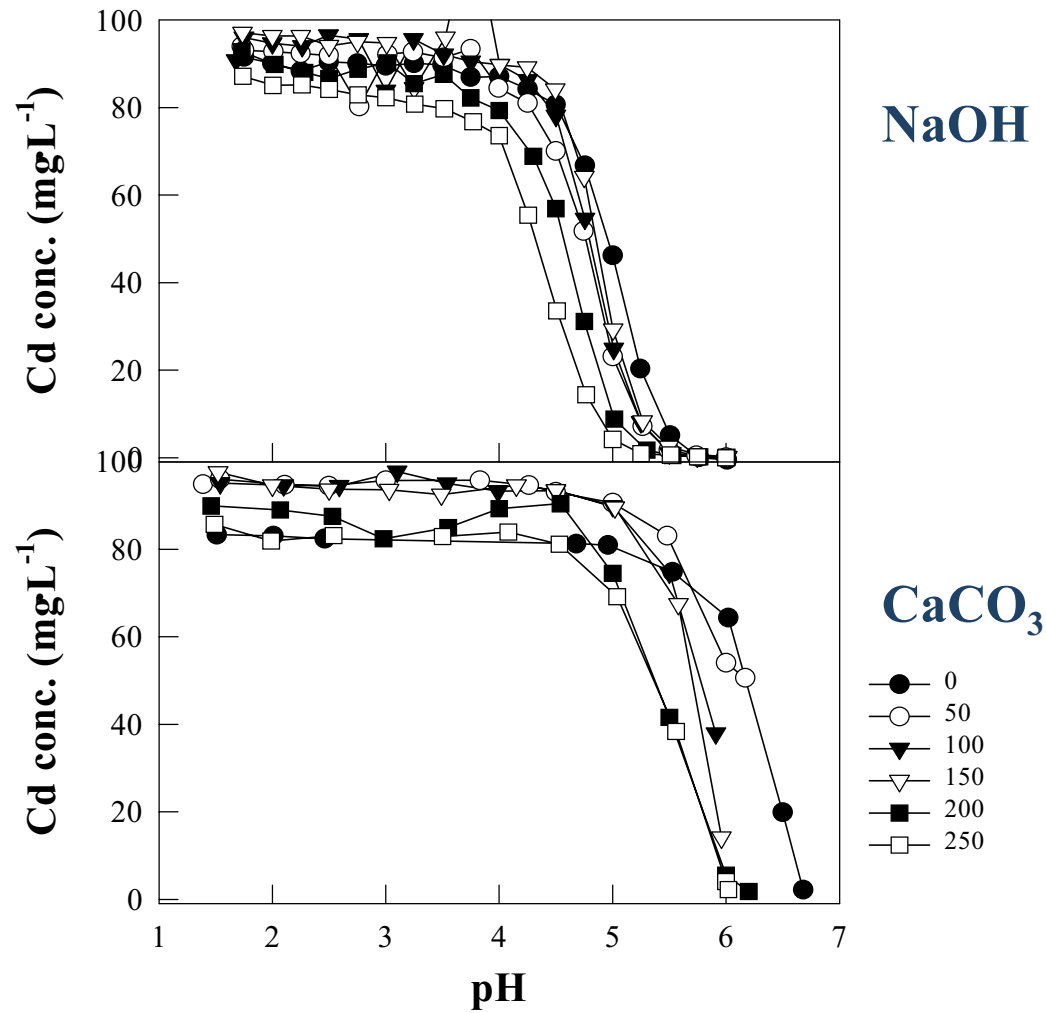
pH에 따른 폐수 중의 잔존 Zn의 농도 변화



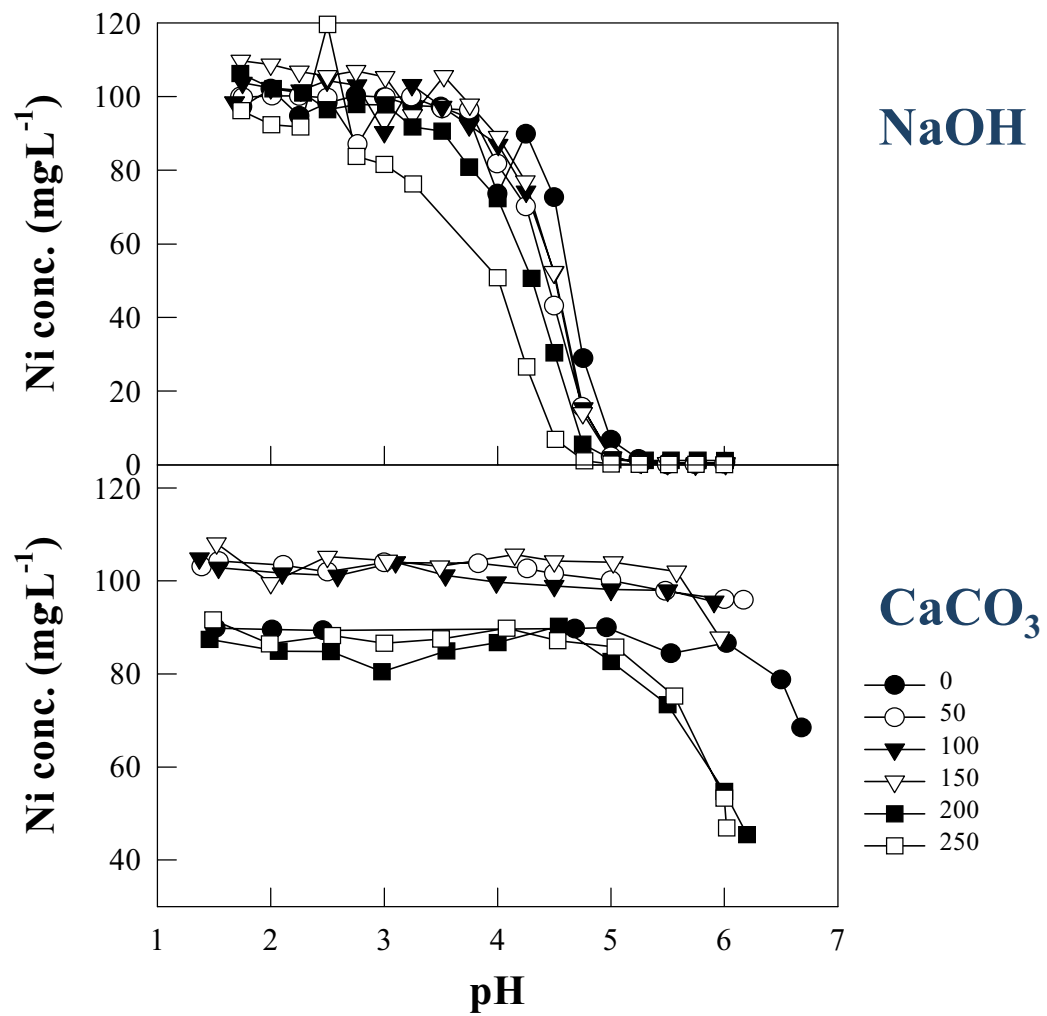
pH에 따른 폐수 중의 잔존 Cr의 농도 변화



pH에 따른 폐수 중의 잔존 Cd의 농도 변화



pH에 따른 폐수 중의 잔존 Ni의 농도 변화



향후연구개발계획

- ◆ 각 단위 공정에서 도출된 결과를 조합한 통합 퇴적물 처리 공정 개발
- ◆ 현재 파일럿 플랜트 제작 중
- ◆ 컨테이너식의 이동식 현장 시설 운전을 통해 선정된 특정 지역 및 특정 오염 퇴적토의 처리 예정