

최종보고서

과제번호 : 23-01-03-02-04

수 질

**사이클론방식을 이용한 서울 및 경기지역  
오수처리시설용 SBR 디캔더 개발**

2024. 1. 17.

이태진



환경부지정  
서울녹색환경지원센터  
Seoul Green Environment Center

## 제 출 문

서울녹색환경지원센터장 귀하

본 보고서를 “사이클론방식을 이용한 서울 및 경기지역 오수처리시설용 SBR 디캔터 개발”에 관한 연구보고서로 제출합니다.

연구기관명 : 서울과학기술대학교

연구책임자 : 이태진교수(환경공학과)

연 구 원 : Matyakubov Behzad,  
Salakhudinov Mukhammadzokhir

공동연구기관명 : 에이치애타(주)

# 요 약 문

## I. 연구개요

- 본 연구개발에서는 SBR 적용형 디켄터의 개발하고자 하며, 이는 원심분리력을 이용할 수 있는 사이클론 형식의 고액분리기의 형태로, 수위차를 이용한 무동력형식의 장치이거나 펌프의 사용이 일부 적용될 수도 있음.
- 유체의 흡입은 표면 상단부에서 일어날 수 있도록 부력을 뿜 수 있는 장치가 적용되며, 기존 시설의 침전 기능을 보완하는 부분 보완으로 하수 유출수의 수질 개선효과를 최대화하고자함.

## II. 연구의 필요성 및 목적

- 본 연구에서는 SBR 공정에서 유용하게 사용할 수 있는 사이클론 방식을 채택한 디켄터 개발을 목표로 함. - 기업의 애로기술 해결을 통한 매출 증대
- 사이클론 디켄터는 상등수에 잔류하는 부유입자를 효과적으로 제거하여 유출수의 수질을 안정적으로 관리함. - 쾌적한 생활환경 조성

## III. 연구의 내용 및 범위

- SBR 사이클론 디켄터의 설계
  - 개발하고자 하는 디켄터는 반응조 상등수를 유입시키고 처리하는 사이클론 본체와 하단에 침강하는 입자가 포집되는 포집 장치로 구성
  - 반응조 상등수의 유출은 외부 동력을 통해 디켄터 위치 조정과 수직 지지대를 통해 디켄터의 안정된 수직 거동을 유도
  - 적정 유입/유출모형 설계를 위한 모의실험 실시  
(CFD software: COMSOL Multiphysics 6.1)
- SBR 공정에서 유출수 유량에 따른 입자 처리 효율성의 상관관계 도출

- 상등액의 유출 유량에 따른 부유입자 제거 시 적정 입경 및 한계 입경을 산정 (합성폐수와 실험폐수 모의실험)
- 부유물질(SS)의 제거와 타 오염물질 (T-N, T-P, COD)의 거동 조사
- 최저 유속의 산정에 따른 유출속도의 확보

## IV. 연구결과

○ 합성폐수를 제조하여 사이클론 디켄터를 이용하여 부유입자의 침강을 유도하였을 때, 본 사이클론 디켄터의 제원에서 유출 유량을  $2.40 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 조절하였을 때 SS 제거효율은 최대 32.37 % 측정되었으며, 최대제거율에 근접하는 양상으로 보아, 적정 유출유량은  $1.20 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 유지함이 적정할 것으로 판단함.

2) ~  $300 \mu\text{m}$ 의 큰 입도 분포를 가진 합성폐수의 경우, 디켄터에 의한 콜로이드성 입자의 제거 비율이 높은 것으로 나타났으며,  $20 \mu\text{m}$  이하의 입자들의 침전은 거의 나타나지 않아 한계입경을  $20 \mu\text{m}$ 로 설정하였음.  $100 \mu\text{m}$ 보다 큰 입자들의 침전이 상당히 원활히 이루어지는 것으로 판단함.

3) T-N의 경우 1.30 - 8.04 % 제거되었으며, T-P의 경우 0.82 - 2.49%, 그리고 COD의 경우 10.70 - 12.24% 가량 제거되었으나 용해성 인자들의 경우 사이클론 형식의 디켄터로 제거할 수 있는 한계가 있다고 사료됨. 최대 32.37 %의 제거량을 나타내었으며, 실험에 사용된 부유입자가 콜로이드성을 감안하였을 때 하이드로사이클론 디켄터의 개발은 의미가 크다고 판단됨.

4) 실험 폐수의 경우 유출유량이  $1.2 \text{ m}^3/\text{hr}$ 에 가까이 근접하면 유량이 증가해도 부유입자의 침강량은 크게 증가하지 않고, 확보된 최적 유량 ( $2.4 \text{ m}^3/\text{hr}$ )에서 부유입자의 제거량은 각각 약 73%, 70%와 74%로 나타남.

5) 최대 유속에서 유효입경(effective diameter)은 저농도, 중농도, 고농도에서  $650 \mu\text{m}$ ,  $800 \mu\text{m}$ ,  $400 \mu\text{m}$ 로 관찰되었고, 한계입경 (limited diameter)은 세 경우 모두 약  $5 \mu\text{m}$  정도로 나타나 이러한 콜로이드성 입자들은 본 실험에서 설정된 사이클론의 유속으로 제거할 수 없는 한계치이라고 평가됨.

6) T-N의 경우 약 4.5 % 제거되었으며, T-P의 경우 평균 1.0 %가량 제거되었다. COD의 경우 평균 36.5 % 가량 제거됨. COD의 경우 일정 이상의 제거률을 보이는 것은 활성슬러지 입자 중 COD 유발할 수 있는 입자의 제거가 사이클론 디켄터에서 수행되었음을 나타냄.

## V. 연구결과의 활용계획

- 지적재산권 출원

특허출원번호:10-2023-0144125,

출원명: 하이드로사이클론 방식의 디켄터, 이를 포함하는 연속식회분반응기 및 그 운전 방법

- 시제품의 제작 및 운영

PLC모델을 이용한 장비의 운영 LOGIC 개발

소규모 pilot 설비의 운영

# 목 차

<b>제1장 서론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구필요성 .....	6
1.2 연구목적 .....	6
<b>제2장 실험방법</b> .....	<b>8</b>
2.1 실험내용 .....	9
2.2 실험장치 .....	10
<b>제3장 연구결과</b> .....	<b>12</b>
3.1 하이드로 사이클론의 공간 해석을 통한 입자 분리 성능의 분석 ..	13
3.2 사이클론을 통한 입자 분리에 미치는 변수 .....	13
3.2.1. 곡률반경 및 유입 선속도에 따른 사이클론의 성능 변화 ...	13
3.2.2 사이클론의 상단과 하단 유출구의 길이에 따른 분리효율 ..	15
3.2.3 사이클론의 하단 유출구의 크기가 입자분리에 미치는 영향	16
3.3 유입/유출모형 설계를 위한 모의실험 .....	18
3.4 최적 유속 설정을 위한 Decanter 모의실험 .....	20
3.4.1 합성폐수를 이용한 입자의 제거효율 산정 .....	20
3.4.2 실폐수를 이용한 입자의 제거효율 산정 .....	24
<b>제4장 결론</b> .....	<b>32</b>
<b>참고문헌</b> .....	<b>35</b>

## 표목차

표 1. 서울 및 경기지역 오수처리시설 현황 .....	3
표 2. 서울지역 오수처리시설 적용공법 .....	4
표 3. Geometric dimensions of cyclone studied .....	16
표 4. SS concentration of inflow/ outflow at the decanter with Silver clay ..	22
표 5. SS concentration of inflow/ outflow at the decanter with Milky clay ..	22
표 6. Removal of T-N, T-P, COD, and suspended solid of the synthesized wastewater according to the flowrate at the decanter of SBR .....	23
표 7. SS concentration of inflow/ outflow at the decanter with real wastewater ranged from 8 mg/L to 86 mg/L .....	25
표 8. SS concentration of inflow/ outflow at the decanter with real wastewater ranged from 120 mg/L to 790 mg/L .....	26
표 9. SS concentration of inflow/ outflow at the decanter with real wastewater ranged from 320 mg/L to 3,000 mg/L. ....	27
표 10. Removal of T-N, T-P, COD, and suspended solid of the real wastewater according to the flowrate at the decanter of SBR .....	31
표 11. Operation sequence of SBR and hydrocyclone decanter .....	31

## 그림목차

그림 1 공법별 국내 하수처리장 및 중국 오수처리시설 점유율 비교 .....	5
그림 2 하이드로사이클론디켄터 및 IC-SBR 반응기(에이치애펙) 모식도 .....	9
그림 3 Schematic diagram of the Sequence Batch Reactor (SBR) .....	10
그림 4 Structure of the linear type inlet (a) and the tangent-circle inlet (b). Solid volume fraction distributions of different size on a horizontal plane ...	14
그림 5 Cyclone showing cyclone dimensions and concepts behind model for seperation performance .....	15
그림 6 Flow pattern of different cyclone in let widths .....	15
그림 7 Experimental results of overall efficiency Vs cyclone length (L) .....	16
그림 8 CFD Surface mesh of cyclone .....	17
그림 9 CFD with RSM turbulence model prediction on the pressure drop of cyclone with different cone tip (A) and Calculated and mesured grade efficiencies for cyclones with different contip diameter (B) .....	17
그림 10 The dimensions of hydrocyclone for this study .....	18
그림 11 Results of particle removals according to the type of inlet and outlet of the cyclone decanter by Computational Fluid Dynamics analysis ..	20
그림 12 Removal efficiencies of suspended solid using the cycleone decanter according to the flowrate. (a) silver clay, (b) Milky clay .....	21
그림 13 Particle distributions of each clay in the inflow and outflow of the cyclone decanter. (a) silver clay, (b) milky clay .....	24
그림 14 Removal efficiencies of suspended solid using the cycleone decanter according to the flowrate with real wastewater ranged from 25 ~ 86mg/L	25
그림 15 Removal efficiencies of suspended solid using the cycleone decanter according to the flowrate with real wastewater ranged from 280~790mg/L	26
그림 16 Removal efficiencies of suspended solid using the cycleone decanter according to the flowrate with real wastewater ranged from 320~1,580mg/L .....	27
그림 17 Particle distributions and accumulated removal amount of each suspended concentration of the real wastewater in the inflow and outflow of the cyclone decanter .....	30



# Contents

<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 Research Necessity .....	6
1.2 Experimental purpose .....	6
<b>Chapter 2 Experimental Methods .....</b>	<b>8</b>
2.1 Experimental contents .....	9
2.2 Experimental apparatus and analysis .....	10
<b>Chapter 3 Results &amp; Discussions .....</b>	<b>12</b>
3.1 Analysis of particle separation performance through spatial analysis of hydrocyclone .....	13
3.2 Variables affecting particle separation through cyclone .....	13
3.2.1. Cyclone performance changes according to curvature radius and incoming linear velocity .....	13
3.2.2 Separation efficiency according to the length of the top and bottom outlets of the cyclone .....	15
3.2.3 Effect of the size of the bottom outlet of the cyclone on particle separation .....	16
3.3 Simulation experiment for inflow/outflow model design .....	18
3.4 Decanter simulation for optimal flowrate setting .....	20
3.4.1 Calculation of particle removal efficiency using synthetic wastewater .....	20
3.4.2 Calculation of particle removal efficiency using real wastewater .....	24
<b>Chapter 4 Conclusion .....</b>	<b>32</b>
<b>Reference .....</b>	<b>35</b>
<b>Appendix .....</b>	<b>36</b>

# 제 1장 서론

---

1.1 연구필요성 .....	6
1.2 연구목적 .....	6

---

# 1. 서 론

일반적으로 하수 중의 오염물질은 생물화학적 산소요구량(BOD)으로 표시되는 유기물과 영양염류인 질소와 인으로 크게 구별되는데, 대부분의 기존 하수처리장에서는 유기물을 주된 처리대상으로 하였기 때문에, 영양염류인 질소와 인의 상당 부분은 충분하게 제거되지 못하고 그대로 하천과 호소 또는 해양 등의 수계로 방류되는 일이 종종 있다. 수계에 하폐수에 포함된 질소와 인이 그대로 방출되면, 하천과 호소 등의 수계에 부영양화 현상을 초래하고, 해양에 유입될 경우 적조 발생의 원인이 된다. 이와 같이 수계의 부영양화가 심해지면 악취가 심하게 나고 수질오염이 가중되며, 식수와 용수로의 사용도 제한을 받게 된다.

따라서, 수계의 부영양화를 방지하기 위해서는 수처리 설비는 영양염류인 질소화합물이나 인산염을 가급적 충분히 제거시켜야 하고, 이와 같은 하폐수 처리를 위한 하수처리장에서는 영양염류인 질소화합물이나 인산염을 제거시키기 위해서 처리대상인 하수 등을 무산소(anoxic) 또는 혐기성(anaerobic) 반응공정, 그리고 호기성(oxic) 반응공정을 거쳐 처리하게 된다. 많은 부분 현재 하수처리장은 영양염류의 제거를 위한 공정 개선이 진행되고 있으나 아직 일부 기존의 설비도 그대로 혼용되어 운용되고 있다. 현재 서울 하수처리구역 내·외로 오수처리시설은 ‘20년 현재 2,935개소, 경기지역은 352,906개소가 설치 운영되고 있다. (표 1)

서울지역 소규모 하수도 처리시설(정화조)의 경우, 처리방식별로 볼 때 자연유하식 부패탱크로 처리하는 방식이 372,226개소(67.4%)로 가장 많았으며 처리용량으로는 10인 이하의 처리용량을 가진 정화조가 131,923개소(23.9%)로 가장 많다. 자연유하식은 고저차를 이용해 흘려보내는 방식으로 타 방식에 비해 운영·관리비가 적고 악취가 적다. 또한 악취저감장치를 의무적으로 설치할 필요가 없어 대부분이 자연유하식 방식을 선택한다. (표 2 참조)

부패 오수처리시설의 경우 하수처리구역 내에는 101~500m<sup>3</sup>/일의 처리용량을 가진 시설이 928개소(35.1%)로 가장 많았으며 하수처리구역 외에는 21~50m<sup>3</sup>/일의 처리용량을 가진 시설이 52개소(35.4%)로 가장 많았다.

표 1. 서울 및 경기지역 오수처리시설 현황 (2020년 하수도 통계, 환경부)

행정구역	총계	오수처리시설															
		하수처리구역 내(㎥/일)								하수처리구역 외(㎥/일)							
		계	2이하	3~10	11~20	21~50	51~100	101~500	501이상	계	2이하	3~10	11~20	21~50	51~100	101~500	501이상
서울특별시	2,788	2,641	44	73	75	430	561	928	530	147	14	40	22	52	10	9	0
경기도	183,744	14,582	4,690	5,088	1,819	1,528	872	525	60	169,162	60,647	79,692	16,117	10,195	1,383	1,003	125
강원도	37,122	6,288	2,259	1,903	739	752	347	254	34	30,834	11,841	12,684	3,304	2,215	409	333	48
충청북도	34,585	1,608	372	509	143	297	164	115	8	32,977	11,804	15,005	3,336	2,276	292	244	20
충청남도	65,663	4,859	2,272	1,370	494	420	213	85	5	60,804	19,477	29,412	5,934	4,469	908	553	51
전라북도	29,063	2,275	828	548	231	372	170	120	6	26,788	16,588	6,705	1,954	1,149	220	165	7
전라남도	34,172	5,477	2,499	1,596	588	550	153	82	9	28,695	14,388	10,489	2,190	1,223	228	157	20
경상북도	43,002	3,649	1,556	1,160	336	360	132	102	3	39,353	17,546	15,055	3,583	2,438	423	276	32
경상남도	42,422	6,894	1,223	2,824	1,121	1,090	341	273	22	35,528	10,927	17,398	4,036	2,604	291	229	43
제주특별자치도	12,524	2,432	1,531	548	183	148	16	6	0	10,092	4,770	4,284	590	338	62	38	10

표 2. 서울지역 오수처리시설 적용공법 (2020년 하수도 통계, 환경부)

행정구역	총 계 (개)	처리방식별					
		부패탱크		살수여상	폭기방법	접촉폭기	기타
		자연유하	강제펌핑식				
서울시	552,430	372,226	8,562	37,694	1,228	14,445	118,275
강남구	21,134	17,467	2,376	188	119	539	445
강동구	18,531	7,598	270	3,917	11	270	6,465
강북구	27,724	12,446	113	17	33	1,764	13,351
강서구	23,238	14,853	309	3,234	54	377	4,411
관악구	34,459	25,830	0	23	4	306	8,296
광진구	24,398	23,706	280	32	37	338	5
구로구	20,728	9,399	235	36	24	828	10,206
금천구	15,067	13,847	161	484	0	314	261
노원구	10,997	7,085	137	430	8	527	2,810
도봉구	15,891	8,048	510	17	13	697	6,606
동대문구	25,547	9,011	270	697	41	217	15,311
동작구	23,033	12,554	169	4,169	11	409	5,721
마포구	23,452	9,706	598	122	156	286	12,584
서대문구	23,897	17,109	0	66	2	451	6,269
서초구	16,230	13,194	535	73	18	461	1,949
성동구	16,780	15,909	363	173	11	207	117
성북구	31,823	15,429	209	46	1	1,536	14,602
송파구	22,566	21,968	0	19	6	177	396
양천구	17,187	10,315	0	6,534	11	299	28
영등포구	22,640	12,575	495	4,235	27	2,169	3,139
용산구	21,985	9,987	219	11,011	9	635	124
은평구	29,993	29,496	134	6	12	345	0
종로구	22,914	20,115	675	1,132	0	481	511
중구	14,944	8,340	504	920	31	483	4,666
중랑구	27,272	26,239	0	113	589	329	2

이러한 공법 중 소규모 하수처리시설에 적용하였을 때 많은 장점을 가지고 있는 연속식회분반응기 (SBR, sequence batch reactor)의 경우 하나의 반응조에서 침전, 반응을 거치기 때문에 설비가 간단하고 유지비용이 적다는 장점이 있어 소규모 오수처리시설에 많이 채택되고 있다. 일부 처리시설이 배출량이 아주 적은 경우 운용이 용이한 자연유하식 부패탱크 방식이 채택되고 있으므로, SBR 공정의 원활한 적용을 위해 그 적용대상은 일일 50톤 이상으로 채택하고자 한다.

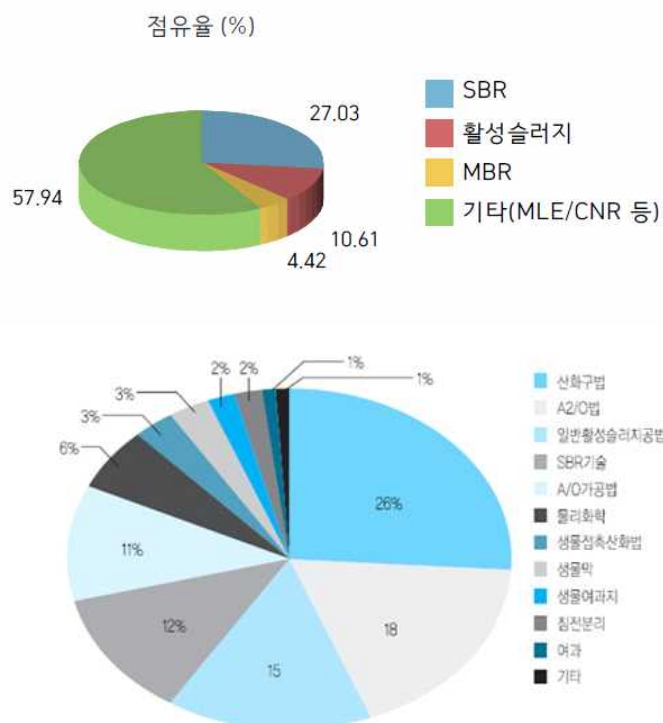


그림 1. 공법별 국내 하수처리장 및 중국 오수처리시설 점유율 비교 (2013, 환경부 & KOTRA GlobalWindow)

하수 중 질소나 인을 제거하기 위한 연속 흐름식 고도 처리의 경우에는 각각의 반응조들을 설치하여야 하기 때문에, 복잡한 설비가 필요하고 이를 유지하는 데에는 SBR 보다는 더 많은 유지비용이 필요하게 되고, SBR의 경우에는 연속 흐름식 고도 처리의 반응조 각각 보다는 반응조 자체의 크기는 커지나 전체적인 설비는 간단하기 때문에 유지비용은 적게 든다. 그리고 SBR은 하나의 단일반응조에서 폐수를 유입 및 유출시키고, 무산소, 혐기, 호기반응(조건)을 시간차를 두고서 연속 구현하는 것으로, 단속 반응조(Intermittent Reactor) 또는 유입-유출 반응조(Fill-and-Draw Reactor)라 하기도 한다. 즉, 연속 흐름식 하수처리는 여러개의 반응조들을 공간개념으로 운용하는 것이고, SBR을 이용한 하수 처리는 하나의 단일반응조에서 여러

반응 단계들을 시간차로 처리하는 시간개념이라는 차이가 있는 것이다. 서울 및 경기지역에서 적용되는 SBR 공정의 비율을 기존 활성슬러지 공정 (그림 1) 중 약 25%를 차지하는 것으로 보았을 때 적지 않은 비율로 적용되고 있음을 유추할 수 있다.

## 1.1 연구 필요성

SBR 반응조는 연속 흐름식 고도 처리의 단일반응조 각각 보다는 반응조 자체의 크기는 커지나 전체적인 설비는 간단하기 때문에 유지비용은 적게 든다. 그리고 SBR은 하나의 단일반응조에서 폐수를 유입 및 유출시키고, 무산소, 혐기, 호기반응(조 건)을 시간차를 두고서 연속 구현하는 것으로, 단속 반응조(Intermittent Reactor) 또는 유입-유출 반응조(Fill-and-Draw Reactor)라 하기도 한다. 즉, 연속 흐름식 하수 처리는 여러 개의 반응조들을 공간개념으로 운용하는 것이고, SBR을 이용한 하수 처리는 하나의 단일반응조에서 여러 반응 단계들을 시간차로 처리하는 시간개념으로 운영하는 차이가 있는 것이다. 연속식 회분반응기(SBR)는 2차 침전지가 불필요하여 최소 부지면적이 요구되므로 소규모 처리 시설에 매우 적합하면서도 사상균의 제어가 용이하고 시공이 간편하여 하수의 안정적 관리 측면에서 매우 바람직한 공정이다.

그러나 전술한 바와 같이 하나의 반응조를 이용하여 호기와 혐기 반응공정이 교차되고, 단위 사이클의 마지막 공정에서 침전을 실시하게 되어 적절한 고액 분리의 기능의 확보는 유출수의 수질을 양호하게 유지하기 위해 중요한 요소이다. SBR은 혐기, 무산소, 호기 및 침전조들이 공간적으로 각각 배치되기 때문에, 침전조에서는 침전만이 수행되어 상등수의 방류 시 침전물의 유출이 차단되지만, 통상 SBR에서는 여러 단계와 반응들이 하나의 조에서 수행되기 때문에, 침전물이 상등수의 방류 시 혼합되기 쉬우므로, 이와 같은 침전물의 유출없이 상등수를 방류시키기 위한 기능성 디켄터의 설치가 필수적이다.

## 1.2 연구목적

본 연구개발에서는 SBR 적용형 사이클론 디켄터를 개발하고자 하며, 이는 원심분리력을 이용할 수 있는 싸이클론 형식의 고액분리기 형태로, 동력비 절감을 위해 수위차를 이용한 무동력형식의 장치이거나 효율을 극대화하기 위해 펌프의 사용이 일부 적용될 수도 있다. 싸이클론에 의한 입자의 분리는 고체 상태의 입자를 용액

으로부터 분리시키기 위해 유체를 회전시킬 때 발생하는 원심력을 이용하여 제거하는 것으로 입자함유 용액이 하향으로 나선운동을 함에 따라 입자는 둘레부분의 벽 쪽으로 이동한 다음 바닥으로 침전하며, 입자가 분리된 용액은 하향의 나선운동을 끝나치고 상향 나선운동을 하게 되며 출구내경을 통하여 배출된다. 싸이클론 형식은 원통에 접한 유입구에서 나선형을 따라 돌면서 내부에 진입할 때 입구에서 유체의 속도는 일정 유속을 유지하며, 입자의 분리를 향상시키기 위해서는 내부선회류의 반지름이 작을수록, 회전각속도가 클수록, 입자 분리속도가 크게 되어 분리효과는 좋아지는 것으로 알려진다.

절단입경과 한계입경은 사이클론의 고액분리효율을 나타내기 위하여 절단입경 사용하는데 50%의 분리효율로 제거되는 입자의 크기는 절단입경( $D_c = D_{c50}$ )으로 표현하고, 한계입경(분리입경, 임계입경)은 100% 제거되는 입자의 최소입경을 나타내는 것으로 한계입경보다 큰 입자는 모두 제거되며 한계입경이 클수록 효율은 떨어진다.

SBR 에서 유체의 흡입은 표면 상단부에서 일어날 수 있도록 부력을 떨 수 있는 장치가 부가적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구개발의 성과물이 하수처리 시설 전체 공정의 수정이 아니라 기존 시설의 침전 기능을 보완하는 부분 수정이 적용되기 때문에 기존 시설의 부분 보완으로 수질 개선효과를 최대화 할 수 있다는 장점이 있다.



## 제2장 실험방법

---

2.1 실험내용 .....	9
2.2 실험장치 .....	10

---

## 2. 실험방법

### 2.1 실험내용

SBR 공정에서 유용하게 사용할 수 있는 사이클론 방식을 채택한 디켄터를 개발

- 활성슬러지 공정의 유입수 및 유출수의 성상 조사
  - 유입수 및 유출수의 오염물질 성상조사 (T-N, T-P, COD, SS, 입도분포)
- SBR 사이클론 디켄터의 설계 (그림 2 참조)
  - 개발하고자 하는 디켄터는 상등수를 유입시키고 처리하는 사이클론 본체와 하단에 침강하는 입자가 포집되는 포집 장치로 구성
  - 유출은 외부 동력을 통해 디켄터 위치 조정과 수직 지지대를 통해 디켄터의 안정된 수직 거동을 유도

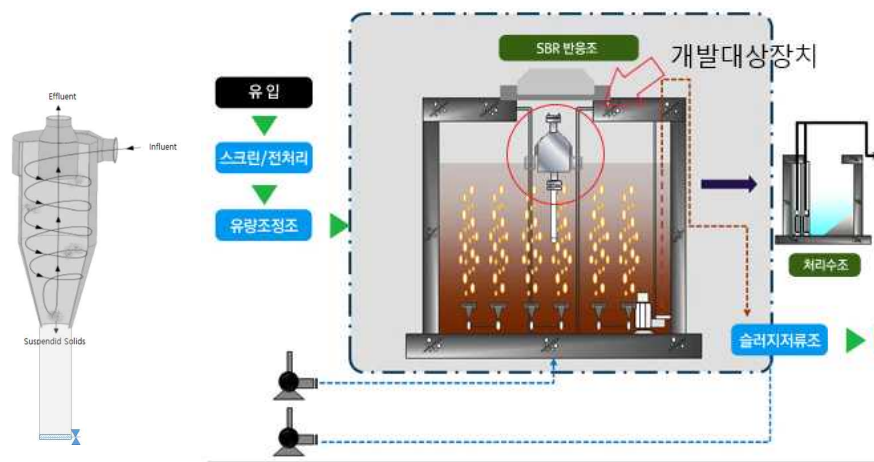


그림 2. 하이드로사이클론디켄터 및 IC-SBR 반응기(에이치애펙) 모식도

- SBR 공정에서 유출수 유량에 따른 입자 처리 효율성의 상관관계 도출
  - 유출 유량 최적화에 따른 입자 제거 적정 입경 및 한계 입경을 산정
  - 부유물질(SS)의 제거와 타 오염물질 (T-N, T-P, COD)의 거동 조사
  - 유입 및 유출구 최적화에 따른 적정입경 및 한계입경의 산정 (FIXED SOLID TYPE)
  - 최저 유속의 산정에 따른 유출속도의 확보

## 2.2 실험장치

본 연구에서 개발하고자 하는 디켄터는 반응조 상단 부분에 디켄터가 위치하고, 상등수 유출 시 디켄터가 상단 수위에 머무를 수 있도록 설계하였다. 디켄터는 사이클론의 형태로 상등수를 유입하여 원심력으로 부유입자를 처리하는 사이클론, 그리고 하단에 침강하는 부유입자를 포집되는 장치로 구성된다. 디켄터 유출관은 외부 동력을 통해 디켄터의 위치 조절이 자동적으로 이뤄질 수 있게 하였고, 수직 지지대를 통해 디켄터가 상단 수면에 위치하여 안정된 수직 거동이 가능하도록 하였다.

SBR 반응기 내 디켄터의 설계는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics-CFD software, COMSOL Multiphysics 6.1) 프로그램을 이용하여 적절 유출수 흐름을 파악한 후 결정하였다(Bhaskar et al.,2007). SBR 반응기의 운전은 디켄터 유출부에 펌프와 변압기를 설치해 디켄터를 통과하는 유출수의 유출 유량을 제어할 수 있게 하였고, 유출 유량과 입자 처리 효율성의 상관관계 도출 및 공정 제어 시점 확보, 유출 유량 최적화에 따른 입자 제거 적정 입경 및 한계 입경을 산정하였다. 실험실규모 반응장치와 물리적 규모는 그림 3에 나타난 바와 같다.

- SBR (sediment tank)reactor

Height: 1.75 m  
d: 0.5 m  
V:  $\approx 0.30688 \text{ m}^3$

- Hydro cyclone

Inlet 2.5 cm,  
Top outlet 2.5 cm,  
Bottom outlet 2.5 cm,  
Height : 18.5 cm

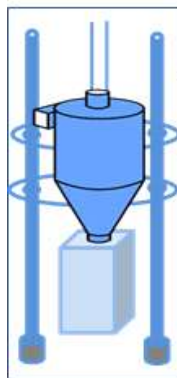


그림. 3 Schematic diagram of the Sequence Batch Reactor (SBR)

하 · 폐수 중 부유입자 거동을 묘사할 시료로는 합성폐수와 실제 공정에서 처리 대상으로 하는 실 폐수를 이용하고자 한다. 합성폐수는 시중 판매되고 있는 마음사(대구, 수성구)의 clay 제품 (Milky clay & Silver clay) 약 12.6g을 물 1L와 함께 믹서기에 넣고 갈아 425  $\mu\text{m}$  채에 걸러 제조하였다. 실 폐수는 협력 연구기관 (에이치애펙)에서 확보하며 실 폐수 또한 425  $\mu\text{m}$  채에 걸러 사용하고자 한다. 시료의 부유입자의 자연침전을 배제하기 위해 실험 전 합성폐수의 입자를 일정 시간 가라앉힌 후 상등액으로 합성폐수를 묘사하였다.

반응조 처리수 내 콜로이드성 부유입자를 구현하기 위해 합성 폐수 1L를 반응조에 투입하고 2시간 동안 침전시킨 후 사이클론 디켄터를 가동하였다. 유입수는 디켄터를 가동하기 직전에 반응조 상부 밸브를 통해 채수하였으며, 유출수는 디켄터를 가동 후 30초, 45초에 각 2회씩 채수하였다. 디켄터의 유출수는 T-N, T-P, COD, SS, 입도분포의 분석을 분석하였다. 디켄터를 통한 유출수 유량을 0.60, 1.20, 2.40  $\text{m}^3/\text{hr}$  (=10, 20, 40 L/min) 로 조절한 후, 수중 입자량을 SS의 측정을 통해 분석하여 유량에 따른 제거효율을 분석하였다. T-N과 T-P는 수질오염 공정시험법에 따라 측정하였으며, COD는 HUMAS (HS-R200)사의 COD 분석장치를 이용하였으며, 입도분포는 서울과학기술대학교 공동실습실험관 입도분석기(BECKMAN COUNTER, LS I3 320)를 사용하는 것으로 분석 의뢰하였다. 실험을 위하여 활성슬러지 공정 중 폭기조에서 시료를 채취하여 각기 다른 농도별로 제거량을 측정 하였다. 각각의 농도는 저농도 (9 mg/L ~ 86 mg/L), 중농도 (120 mg/L ~ 790 mg/L), 고농도 (320 mg/L ~ 3,000 mg/L)로 설정하여 실험하였다. 디켄터의 유출 유량은 합성폐수에서 실시한 경우와 동일하게 0.60, 1.20, 2.40  $\text{m}^3/\text{hr}$ 로 조절하여 유입수, 유출수에 포함된 부유입자의 농도를 측정하였다.

## 제3장 연구결과

---

3.1 하이드로 사이클론의 공간 해석을 통한 입자 분리 성능의 분석 .....	13
3.2 사이클론을 통한 입자 분리에 미치는 변수 .....	13
3.3 유입/유출모형 설계를 위한 모의실험 .....	18
3.4 최적 유속 설정을 위한 Decanter 모의실험 .....	20

---

### 3. 연구결과

#### 3.1 하이드로사이클론의 공간 해석을 통한 입자 분리 성능의 분석

하이드로사이클론은 원심력을 사용하여 물, 기체, 고체, 먼지를 포함한 다양한 유체 혼합물에서 입자를 분리하는 데 널리 사용되는 구조이다. 하이드로사이클론의 기하학적 설계에서는 유입부의 체적, 높이 및 너비, 실린더 높이, 사이클론 총 높이, 하단부 콘의 직경 및 상단부 유출구의 직경과 같은 주요 매개변수들이 고려된다. 이러한 매개변수는 일반적으로 사이클론 본체의 직경에 상대적인 비율로 표현되기도 하는데 이들은 입자 분리의 효율성에 큰 영향을 미친다. 하이드로 사이클론의 작동은 매우 단순한데, 입자가 포함된 물은 원뿔형 본체 상단에 있는 측면 유입구를 통해 들어가서 아래쪽으로 이동하며 내부에서 소용돌이를 형성한다. 유체의 유속이 증가함에 따라 원심력이 발생하여 유체에서 입자를 분리하는 데 중요한 역할을 하게 되고, 결과적으로, 분리된 입자는 아래쪽으로 이동하여 하단 유출구를 통해 하이드로사이클론의 바닥에서 빠져 나가게 된다. 동시에 유체는 원뿔형 본체 하단부에 도달하면 내부 소용돌이가 형성되어 입자들만 바닥에 분리하고 위쪽으로 이동하여 상단 유출구를 통해 정화된 형태의 유체로 밖으로 나가게 된다.

#### 3.2 사이클론을 통한 입자 분리에 미치는 변수

##### 3.2.1. 곡률반경 및 유입 선속도에 따른 사이클론의 성능 변화

(Zhang et al., 2016) 연구에 따르면 사이클론 유입구 모양의 곡률은 분리 효율, 입자 분포 및 사이클론 분리기의 전반적인 성능에 상당한 영향을 미친다. 그림 4는 곡률반경이 작은 경우 입자의 사전 분류에 도움을 줄 수 있다는 것을 보여준다. 이러한 입자의 사전 분류는 하이드로사이클론 분리에 필수적인 피드 입자의 위치를 재정렬하고 재정렬의 결과는 미립 입자는 반경 방향을 따라 내측으로 모이는 반면, 조대 입자는 외측으로 집중된다. 따라서 조대 입자는 분리 공간으로 유입되고 단락 흐름이 더 적어지는 현상을 볼 수 있다. 단, 본 연구의 경우 기존의 연구결과에서

보여지는 유입구의 곡률에 따른 처리효율 차이와 슬러지의 분리에 필요한 외벽의 침적을 고려하여 일반적 사이클론의 형태를 채택한다.

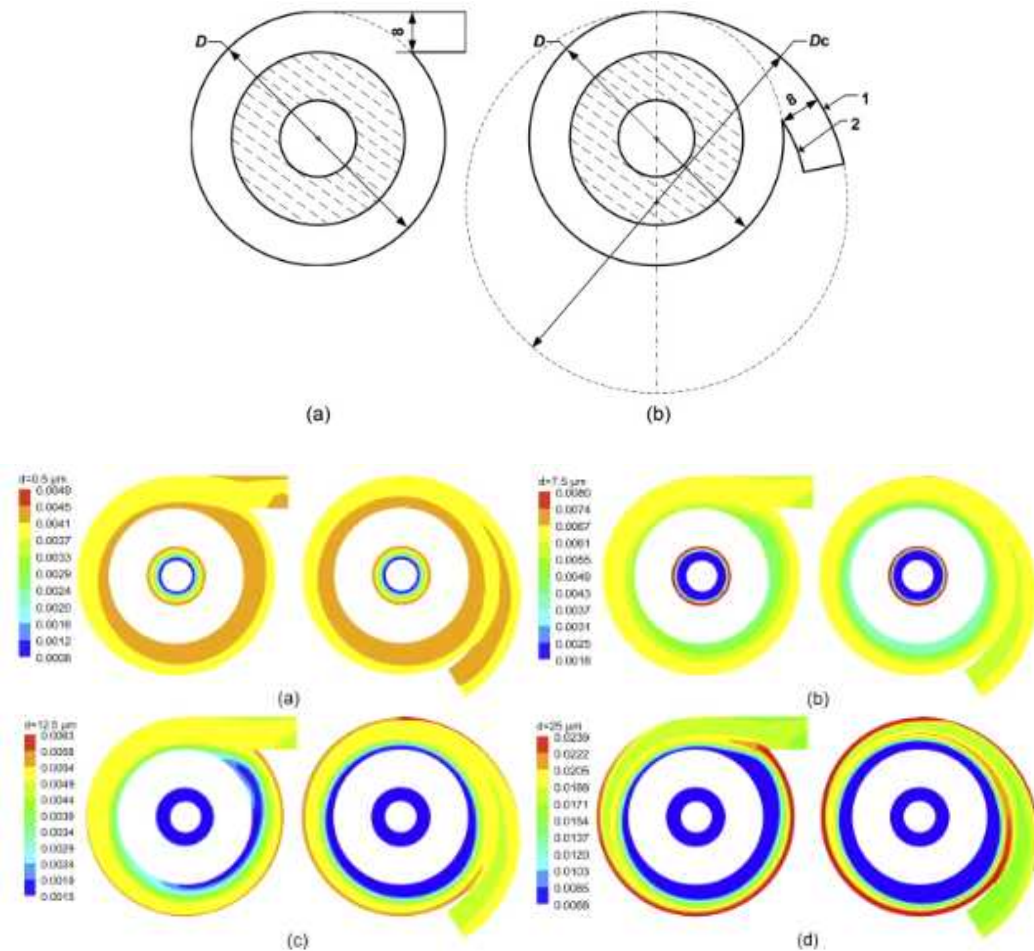


그림 4. Structure of the linear type inlet (a) and the tangent-circle inlet (b). Solid volume fraction distributions of different size on a horizontal plane: left is hydrocyclone; and right is  $D_c=1.2D$ , (Zhang et al., 2017)

그림 5에 사이클론 공간을 나타내는 각각의 기호들을 나타내었다. (CHUAH et al., 2004)의 연구에서는 (그림 5) 사이클론 유입구의 너비를 늘리면 소용돌이가 입구에서 조여져 사이클론 내부의 소용돌이 형성이 불량하고 입자 분리 효율이 낮아지게 된다고 보고하였다. 소용돌이 형성이 불량하면 사이클론 내부의 회전이 부족하여 원심력과 입자가 액체에서 분리가 저하되게 된다. 보고서에 따르면 유입구의 지름은  $(D-D_e)/2$  보다 작아야 하는 것으로 나타났다 (그림 6).

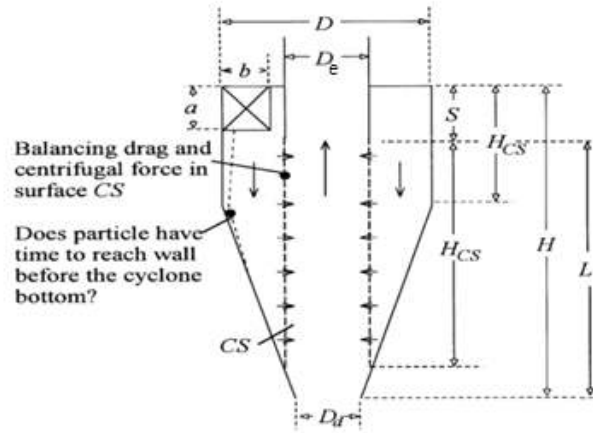


그림 5 Cyclone showing cyclone dimensions and concepts behind model for separation performance (Vega-Garcia et al., 2018)

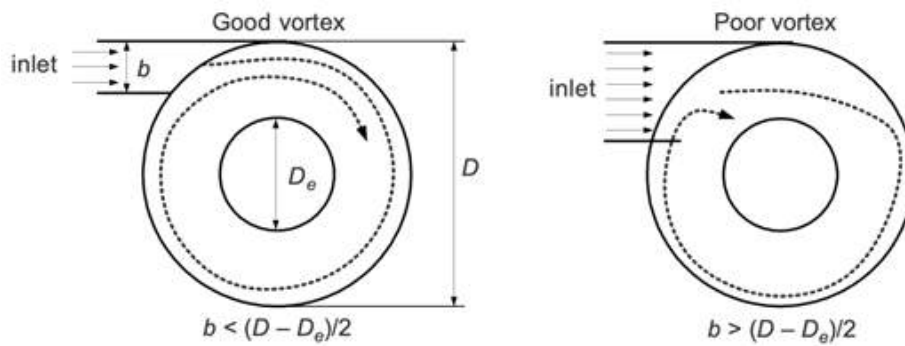


그림 6 Flow pattern of different cyclone in let widths. (CHUAH et al., 2004)

### 3.2.2 사이클론의 상단과 하단 유출구의 길이에 따른 분리효율

사이클론 분리 능력을 좌우하는 것은 원심력의 형성과 그에 따른 유체로 부터 입자의 분리이다. 원심력은 항력에 대해 액체에서 입자를 분리하므로, 입자가 클수록 유체에서 분출하기가 더 쉽고 분리된 입자는 원심력에 의해 사이클론의 벽에 도달하게 된다. (Hoffman et al., 2001)의 연구에 의하면 사이클론의 상단과 하단 유출구의 길이는 사이클론의 입자 분리 능력을 높이거나 낮출 수 있는데, 일정 길이까지는 사이클론의 상단과 하단의 길이를 늘리면 성능이 향상되나 적정 길이가 넘어가면 효율은 떨어진다는 것이 관찰되었다. (그림 7) 이 실험에서 입자의 크기는  $0.3\mu\text{m}$ 에서  $60\mu\text{m}$  사이였으며 평균은  $3.65\mu\text{m}$ 이고 비중은  $2.73\text{ g/cm}^3$  이었다.



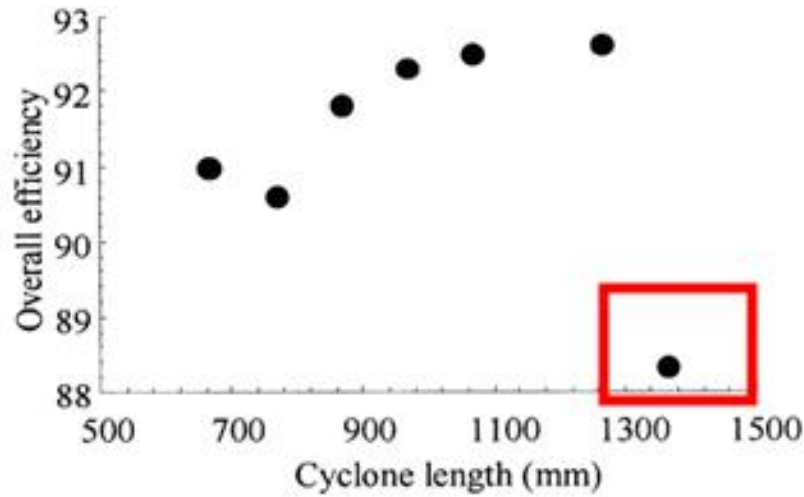


그림 7. Experimental results of overall efficiency Vs cyclone length (L) (Hoffman et al., 2001)

### 3.2.3 사이클론의 하단 유출구의 크기가 입자분리에 미치는 영향

(Xiang et al., 2000)의 연구에서는 다양한 사이클론 공간 크기가 분리 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 세 가지 다른 크기의 사이클론 CFD 모사 결과 하단 유출구의 직경 (Fig. 2 D<sub>d</sub>)이 작은 사이클론이 더 높은 축 방향 및 접선 속도로 인해 더 높은 수집 효율과 압력 강하를 갖는 것으로 나타났다. (표 3 와 그림 8) 유출구의 직경이 더 작은 사이클론은 사이클론 내에서 접선 속도가 높아지므로 입자에 작용하는 원심력이 향상된다. 또한 유출구의 직경이 작은 사이클론 내부에서 더 높은 속도가 유지되며, 직경이 증가함에 따라 사이클론 압력 강하는 감소하게 된다. 그림 9)

표 3. Geometric dimensions of cyclone studied. (Xiang et al, 2000)

a	b	D <sub>e</sub>	S	h	H	D <sub>d</sub>			D
						Cyclone I	Cyclone II	Cyclone III	
12.5	5	15.5	15.5	31	77	19.4	15.5	11.6	31



그림 8 CFD Surface mesh of cyclone

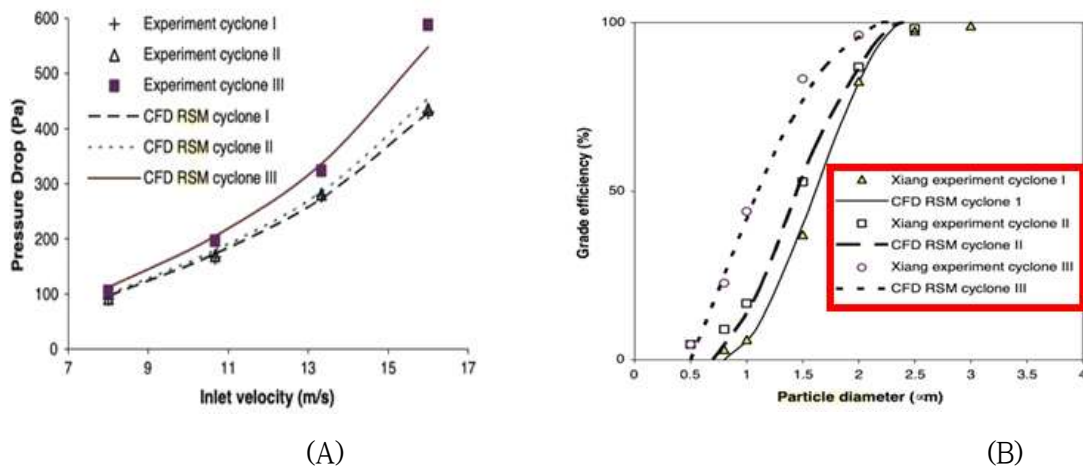


그림 9 CFD with RSM turbulence model prediction on the pressure drop of cyclone with different cone tip (A) and Calculated and mesuared grade efficiencies for cyclones with different contip diameter (B) (Xiang et al., 2000)

앞 절에서 기술한 바와 같이 사이클론의 기하학적 디자인과 크기는 입자의 제거 효율에 중요한 영향을 미친다. 기존에 도출된 주요 연구 결과를 이용하여 본 실험에서 사용하고자 하는 사이클론의 크기와 높이를 그림 10에 나타내었다. 설계 시 고려되어지는 실험 장치는 원뿔의 치수를 줄이고 입구를 줄여서 입자 분리를 향상하고자 하였으며, 적절한 형태의 사이클론을 채택하여 작은 범위의 입자에 대해서도 에너지 효율적이고 입자 분리 성능을 극대화 하고자 하였다.

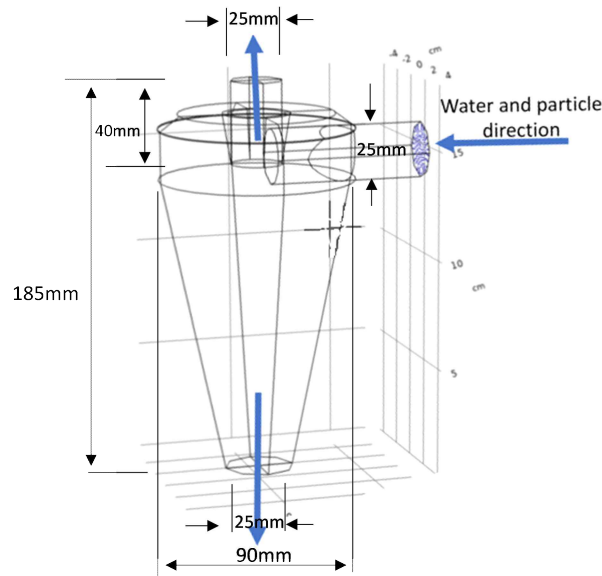


그림 10. The dimensions of hydrocyclone for this study.

### 3.3 유입/유출모형 설계를 위한 모의실험

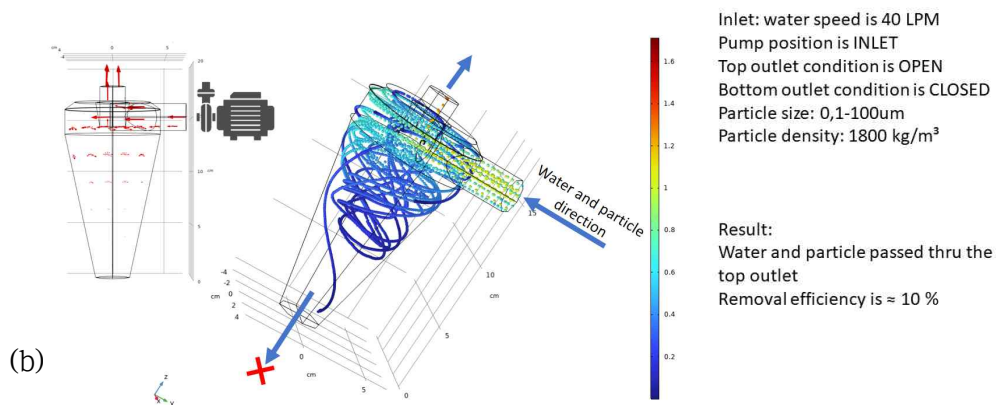
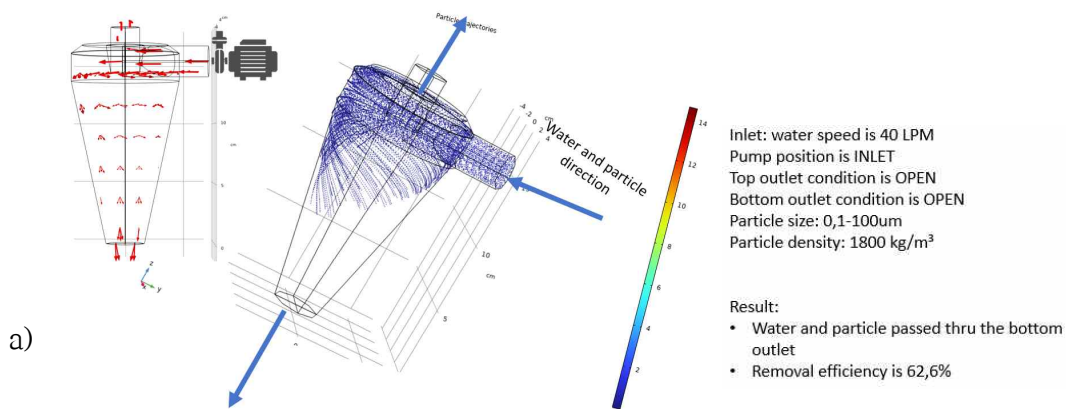
반응기 상등액의 디센터 유입/유출을 최적화하기 위해 CFD software (COMSOL Multiphysics 6.1, Burlington, MA 01803, USA)를 이용하여 유입구와 유출구의 형태에 따른 부유입자의 제거효율을 전산묘사하여 보았다. 전산묘사는 유출을 위한 펌프의 위치에 따른 사이클론 디센터에 상등액의 유입 형태 (디센터 우측과 상단 유출구)와 디센터 상단과 하단의 입구의 개방여부에 따라 4 가지의 형태로 구분하였다.

그림 11에 나타나는 바와 같이 상등액을 펌프를 이용하여 디센터 우측에서 유입하는 경우, 시간 당 약  $2.4 \text{ m}^3$ 의 상등액을 유출한다고 하였을 때 제거율은 상단과 하단 입구가 모두 개방되었을 때(그림 11 (a)) 제거율은 62.6%로 상당량의 입자가 제거되는 양상을 나타내었으나, 하이드로 사이클론이 반응기 내부에 설치되고 하단으로 유출되는 유입수의 유속에 의해 반응기 하단에 침전된 슬러지의 부상이 일어날 수 있으므로 본 연구에서는 그림 11(a)의 경우는 제외하는 것으로 결정하였다. 더욱이 하단과 상단 유출구가 개방되었을 때 목표하는 상등액의 유출을 기대하기 위해서는 두배 이상의 상등액의 유입속도를 유지해야 하므로 경제성에서도 낮은 평가가 주어진다가 볼 수 있다. 슬러지의 부상을 막을 수 있는 경우인 하단 유출구를 폐쇄하였을 때 ((그림 11 (b))  $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 의 직경을 가지는 입자의 10% 제거율을 확

인할 수 있었다.

상등액을 펌프를 이용하여 디켄터 상부로부터 유출하는 경우 같은 유량을 가지는 조건에서 디켄터 좌측과 하단이 개방되어 있는 경우에는 ((그림 11 (c)), 상등액은 좌측 유입구를 통해 들어오지만 하단으로도 유입되는 결과를 볼 수 있었으며 이 때의 제거율은 거의 없다는 것을 확인하였다. 단, 디켄터 좌측이 개방된 상태에서 상등액을 디켄터 상부에서 유출 시키고 하단이 막혀있는 경우 ((그림 11 (d)) 약 40%의 입자가 제거될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

따라서 실험실 규모의 침전조(SBR 반응조)를 제작함에 있어서 디켄터의 유형은 사이클론 형태의 디켄터를 사용하고 하단이 막혀있는 형태에서 상등액의 유출은 상부에서 실시되는 것으로 설계하였다.



Continued)

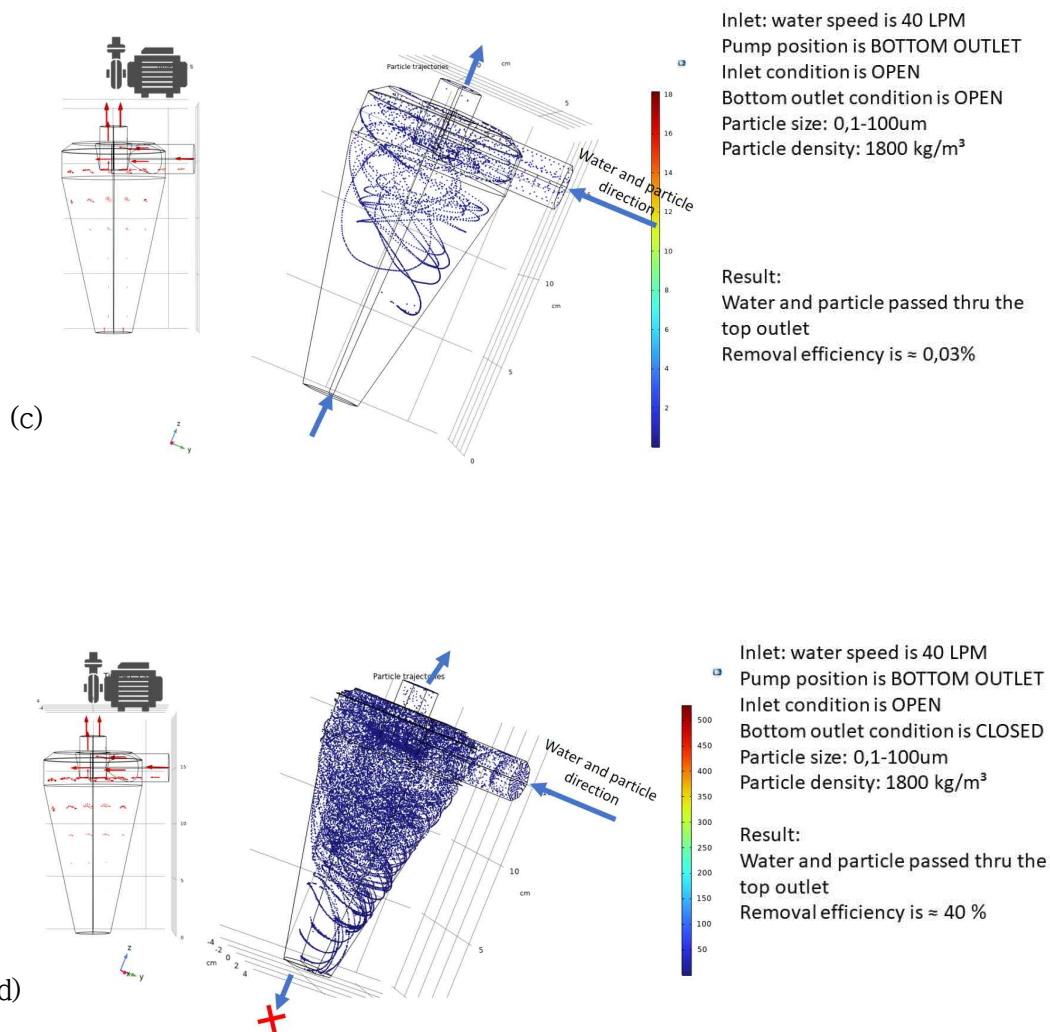


그림 11. Results of particle removals according to the type of inlet and outlet of the cyclone decanter by Computational Fluid Dynamics (CFD, COMSOL Multiphysics 6.1) analysis

### 3.4 최적 유속 설정을 위한 Decanter 모의실험

#### 3.4.1 합성폐수를 이용한 입자의 제거효율 산정

실험실 규모 반응조 실험에서는 수중 입자성 물질을 직접적으로 제시하는 지표인 SS 분석을 통해 공정의 제어시점을 확보하고자 하였다. 디칸터의 유출 유량을 0.60, 1.20, 2.40 m<sup>3</sup>/hr로 조절하여 유입수, 유출수에 포함된 부유입자의 농도를 측정하고

제거효율을 계산하였으며, 회귀분석을 통해 유량 (선속도)에 따른 제거효율의 상관관계를 분석하였고 이를 그림 12에 제시하였다.

합성폐수는 milky clay와 silver clay로 명명하였으며, 이는 수중의 함유된 부유입자의 특성을 나타낸다. 이 입자들은 kaolinite가 주성분인 점토성입자로 합성폐수로 조성되었을 때 현탁액의 색에 따라 명명하였다. milky 그리고 silver clay는 약 40  $\mu\text{m}$ 의 입경을 주로 가진 입자이나 silver clay는 250  $\mu\text{m}$ 의 입자까지 분포하고 있으며, milky clay의 경우 150  $\mu\text{m}$ 의 입자로 구성되어 입도의 직경이 silver clay보다 더 작게 분포되어 있다. clay 입자들을 이용하여 합성폐수를 조성한 다음 반응기에서 2 시간 가라 앉힌 후 콜로이드성 부유입자들을 함유한 상등액을 사이클론디켄터를 통해 유입하여 배출하였다. 실험은 같은 유량에서 4번 반복되었으며, 각 평균값을 이용하여 사이클론 디켄터의 최적 유량(최적 선속도)을 선정하였다.

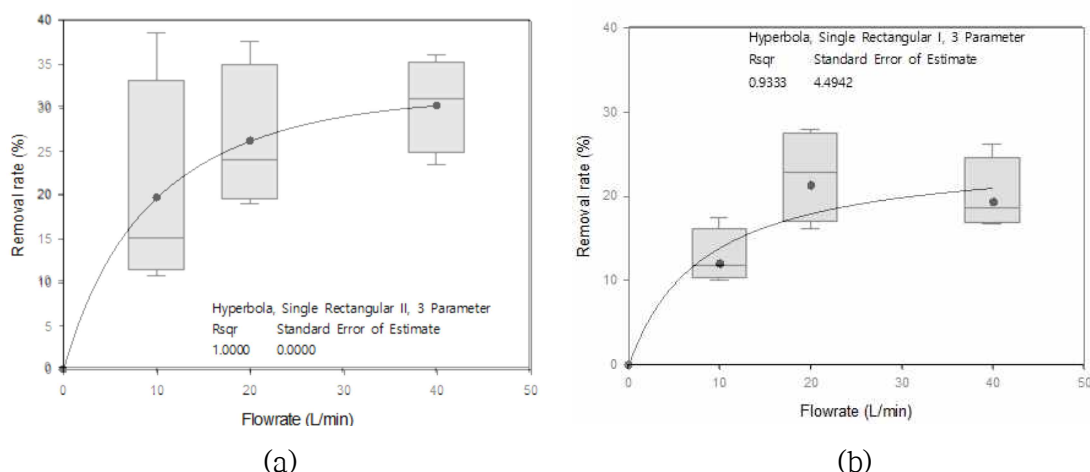


그림 12. Removal efficiencies of suspended solid using the cyclone decanter according to the flowrate. (a) silver clay, (b) Milky clay. Regression was accomplished by Hyperbola, Single Rectangular I, 3 Parameter, Sigma Plot.

그림 12에서 보여지는 바와 같이 본 실험조건에서 유출유량이 1.2  $\text{m}^3/\text{hr}$ 에 가까이 근접하면 유량이 증가해도 부유입자의 침강량은 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다. 본 실험에서 확보된 최적 유량에서 milky 그리고 silver clay의 제거량은 각각 약 20%와 30%로 나타났다. (표 4와 표 5) 상한을 갖는 지수증가 곡선식을 사용해 유량별 계산된 제거효율의 평균값과 유출 유량의 상관관계를 분석하였으며 R값은 0.933- 1.000, 평균 상한 제거효율은 약 32.37 %로 계산되었다.

표 4. SS concentration of inflow/ outflow at the decanter with Silver clay.

Flowrate(m³/hr)	Control(0)	0.6	1.2	2.4	
Sample (mg/L)	1	30	25	22	23
	2	38	34	30	27
	3	104	64	65	70
	4	106	92	86	68
average (mg/L)	69.5	53.75	50.75	47	
removal rate (%)		22.67	26.97	32.37	

합성폐수에서 사용된 입자들이 콜로이드성 입자들이 이용되었다는 것을 감안할 때 사이클론 디켄터에 의한 부유입자의 제거효율은 적지 않은 것으로 판단하였고, 입자의 직경의 제거 양상을 확인하기 위해 디켄터 유입수와 유출수의 입자의 입도 분포를 분석하여 보았다. (오종민 외 2001) 본 실험에서 최적 제어시점은 제거효율이 최대값에 수렴하기 시작하는 부분으로, 유출 유량을 약 1.20 m<sup>3</sup>/hr로 조절하였을 때 최대값에 수렴하는 결과가 도출될 수 있음을 알 수 있었다.

표 5. SS concentration of inflow/ outflow at the decanter with Milky clay.

Flowrate(m <sup>3</sup> /hr)	Control(0)	0.6	1.2	2.4
Sample (mg/L)	1	23	19	17
	2	41	36	33
	3	36	32	26
	4	50	45	42
average (mg/L)	37.5	33	29.5	30.25
removal rate (%)		12.00	21.33	19.33

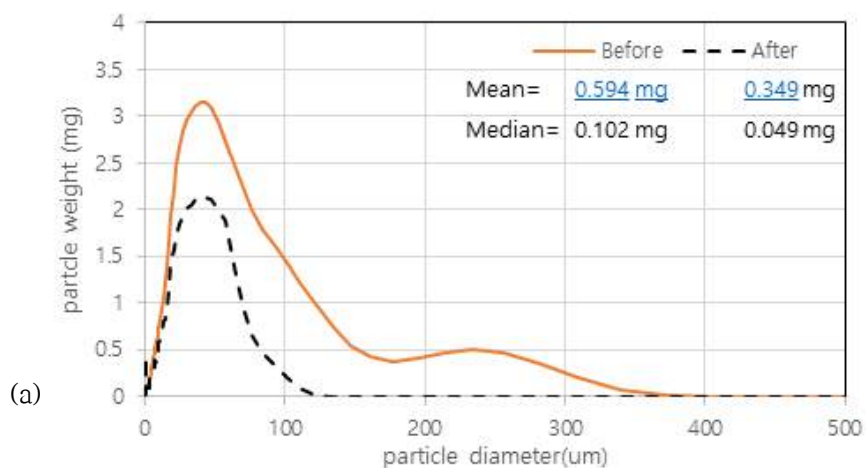
사이클론 디켄터를 이용한 입자와 제거와 더불어 유입수, 유출수의 일부 주요 수질 항목의 농도를 측정하여 이에 따른 제거효율을 계산하였고, 그 결과를 표 6에 나타내었다. T-N의 경우 1.30 ~ 8.04 % 제거되었으며, T-P의 경우 평균 1.66 %가량 제거되었다. COD의 경우 평균 11.43 % 가량 제거되었다. T-N과 T-P, COD의 경우 점토의 특성상 입자성 질소와 인의 함유량이 많지 않고, 용해성 질소나 인의 경우 침전성이 거의 없으므로 사이클론 디켄터의 적용으로 효과적인 제거는 기대하기 어려울 것으로 판단 되었다.



표 6. Removal of T-N, T-P, COD, and suspended solid of the synthesized wastewater according to the flowrate at the decanter of SBR

항목	T-N	T-P	COD	SS
제거효율 범위 (%)	1.30-8.04	0.82-2.49	10.70 - 12.24	12.00-32.37
평균값 (%)	4.40	1.66	11.43	22.45

사이클론 디켄터를 통한 입자들의 제거양상을 확인하기 위해 2.4 m<sup>3</sup>/hr 유량으로 유입되는 상태에서 디켄터의 유입수와 유출수에서 입도분포를 측정하였다. (그림 13) 두 종류의 clay를 포함한 상등액에서 유입수에 비해 유출수 중 입자 입경의 평균값과 중앙값이 모두 줄어들었으며, 이는 곧 디켄터로 인해 입경이 큰 입자는 제거되었음을 알 수 있다. 사이클론이 원심력을 이용하여 입자를 침강시키는 원리에 부합하여 입경이 큰 입자들의 제거는 눈에 두드러지게 나타났으나 입자의 직경이 100  $\mu$ m 이하로 줄어드는 경우 상등액에 남아있는 부분이 있음을 고려할 때 (특히 silver clay의 경우) 100  $\mu$ m 이하 입자들의 침전을 유도하기 위해서는 좀 더 큰 유량으로 배출하는 것도 고려해 볼 만하다.



continued



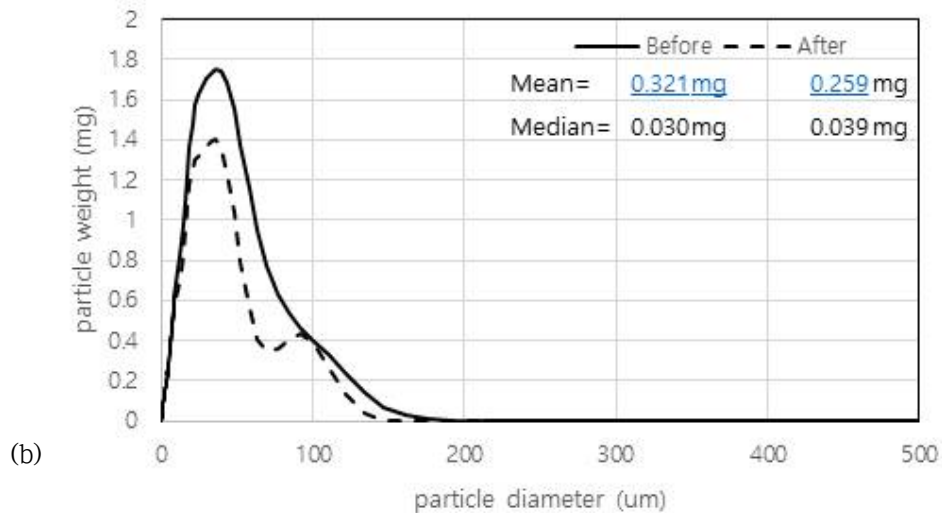


그림 13. Particle distributions of each clay in the inflow and outflow of the cyclone decanter. (a) silver clay, (b) milky clay

입도 분포에 있어서 silver clay의 경우 입도의 분포가 300  $\mu\text{m}$ 까지 분포하여 상대적으로 milky clay 보다 입경이 크므로 디켄터에 의해 제거하는 비율이 높았던 것으로 판단하였다. 특히 본 실험에서 주목할만한 것은 각 종류의 clay에서 20  $\mu\text{m}$  이하의 입자들의 침전은 거의 나타나지 않는다는 것이다. 결론적으로 사이클론을 이용한 디켄터의 적정 유출 유량은 1.20  $\text{m}^3/\text{hr}$ 로 조절하였을 때 이였으며, 제거 한계입경은 약 20  $\mu\text{m}$ 인 것으로 판단하였다.

### 3.4.2 실패수를 이용한 입자의 제거효율 산정

실패수를 이용한 하이드로사이클론 디켄터 실험은 의정부 물재생센터의 폭기조에서 시료를 채취하여 실험실 규모 SBR 반응기에 투입하여 모사하였다. 각각의 농도는 저농도 (25 ~ 86  $\text{mg/L}$ ), 중농도 (280 ~ 790  $\text{mg/L}$ ), 고농도 (1,200 ~ 3,000  $\text{mg/L}$ )로 설정하여 실험하였다. 디켄터의 유출 유량은 합성폐수에서 실시한 경우와 동일하게 0.60, 1.20, 2.40  $\text{m}^3/\text{hr}$ 로 조절하여 유입수, 유출수에 포함된 부유입자의 농도를 측정하고 제거효율을 계산하였으며, 회귀분석을 통해 유량 (선속도)에 따른 제거효율의 상관관계를 분석하였고 이를 그림 14, 그림 15, 그림 16에 제시하였다. (표 7, 8, 9 참조) 실패수를 조성한 반응기 내에서 2 시간 동안 입자를 가라 앉힌 후 콜로이드성 부유입자들을 함유한 상등액을 사이클론디켄터를 통해 유입하여 배출하였다. 저농도 실험 (9  $\text{mg/L}$  ~ 86  $\text{mg/L}$ )에서 실험은 같은 유량에

서 7번 반복되었으며, 각 평균값을 이용하여 사이클론 디켄터의 최적 유량(최적 선속도)을 선정하였다. 7번 실험의 평균값으로 67.9 % 73.2%의 입자 제거율을 확인할 수 있었으며, 2.4 m<sup>3</sup>/hr의 유량에서 최대값을 나타내었다.

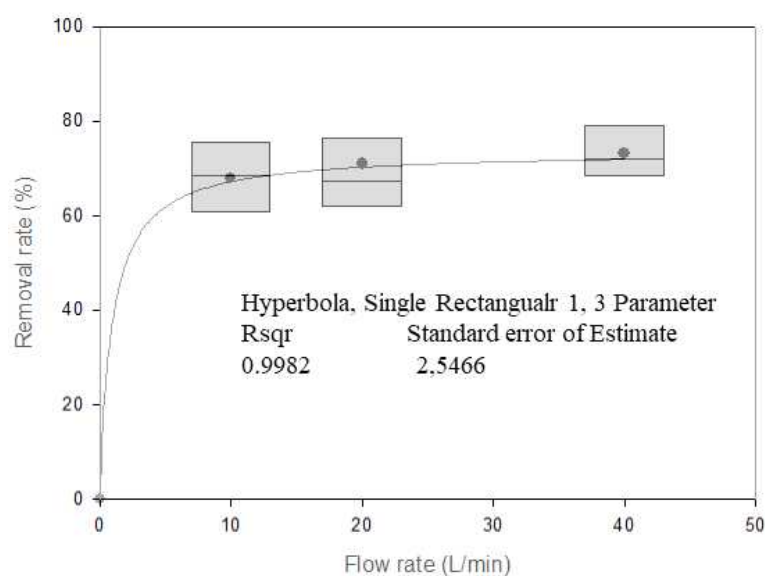


그림 14. Removal efficiencies of suspended solid using the cycleone decanter according to the flowrate with real wastewater ranged from 25 ~ 86 mg/L. Regression was accomplished by Hyperbola, Single Rectangular I, 3 Parameter, Sigma Plot.

표 7. SS concentration of inflow/ outflow at the decanter with real wastewater ranged from 8 mg/L to 86 mg/L.

Flowrate(m <sup>3</sup> /hr)		Control	0.6	1.2	2.4
Sample (mg/L)	1	25	11	11	7
	2	38	9	9	8
	3	35	9	10	8
	4	82	32	31	28
	5	86	31	28	27
	6	51	16	17	15
	7	49	12	11	10
average (mg/L)		52.2	17.1	15.2	14.71
removal rate (%)			67.9	71.00	73.2

중간 농도 (120 ~ 790 mg/L)의 실패수 실험 결과를 그림 15과 표 8에 나타내었다. 실험은 같은 유량에서 7번 반복되었으며, 각 평균값을 이용하여 사이클론 디켄터

의 최적 유량(최적 선속도)을 선정하였다. 7번 실험의 평균값으로 63.2 %에서 70.9%의 입자 제거율을 확인할 수 있었으며, 2.4 m<sup>3</sup>/hr의 유량에서 최대값을 나타내었다. 저농도의 제거율 양상과 비슷하게 나타났으며, 저농도와 중농도에서 모두 70%가 넘는 양호한 제거율을 보여주었다.

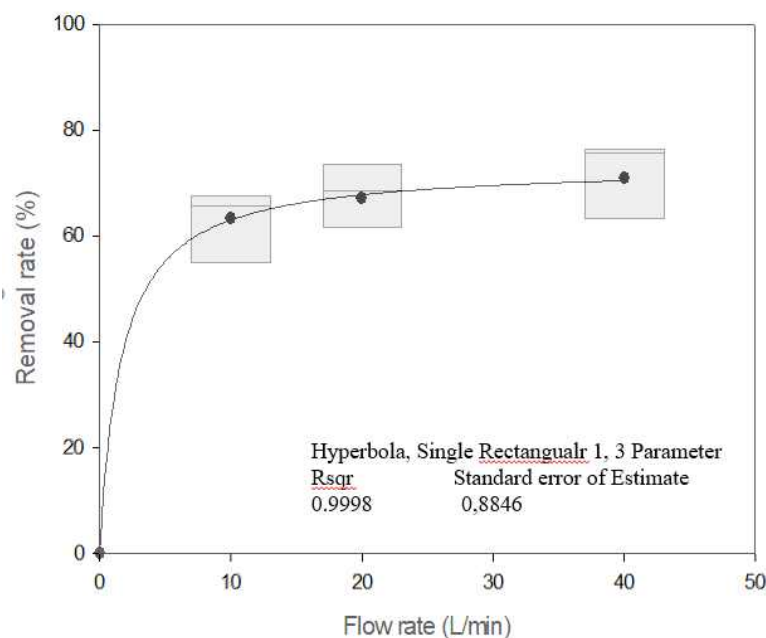


그림 15. Removal efficiencies of suspended solid using the cyclone decanter according to the flowrate with real wastewater ranged from 280 ~ 790 mg/L. Regression was accomplished by Hyperbola, Single Rectangular I, 3 Parameter, Sigma Plot.

표 8. SS concentration of inflow/ outflow at the decanter with real wastewater ranged from 120 mg/L to 790 mg/L.

Flowrate(m <sup>3</sup> /hr)		Control(0)	0.6	1.2	2.4
Sample (mg/L)	1	700	240	220	170
	2	280	130	130	130
	3	760	280	240	180
	4	600	270	230	220
	5	790	230	210	190
	6	760	250	180	170
	7	370	120	120	170
average (mg/L)		608.5	217.1	192.8	175.7
removal rate (%)			63.2	67.0	70.9

고농도 (320 ~ 3,000 mg/L)의 실패수 실험 결과를 그림 16과 표 9에 나타내었다. 실험은 같은 유량에서 4번 반복되었으며, 각 평균값을 이용하여 사이클론 디켄터의 최적 유량(최적 선속도)을 선정하였다. 4번 실험의 평균값으로 66.6 %에서 73.5%의 입자 제거율을 확인할 수 있었으며, 2.4 m<sup>3</sup>/hr의 유량에서 최대값을 나타내었다. 중간 농도의 제거율 양상과 유사하였으며, 저농도, 중농도와 고농도에서 모두 70%가 넘는 양호한 제거율을 보여주었다. 이는 사이클론 디켄터를 SBR 반응기에 적용하는 것은 긍정적 요소가 많다는 것을 나타낸다.

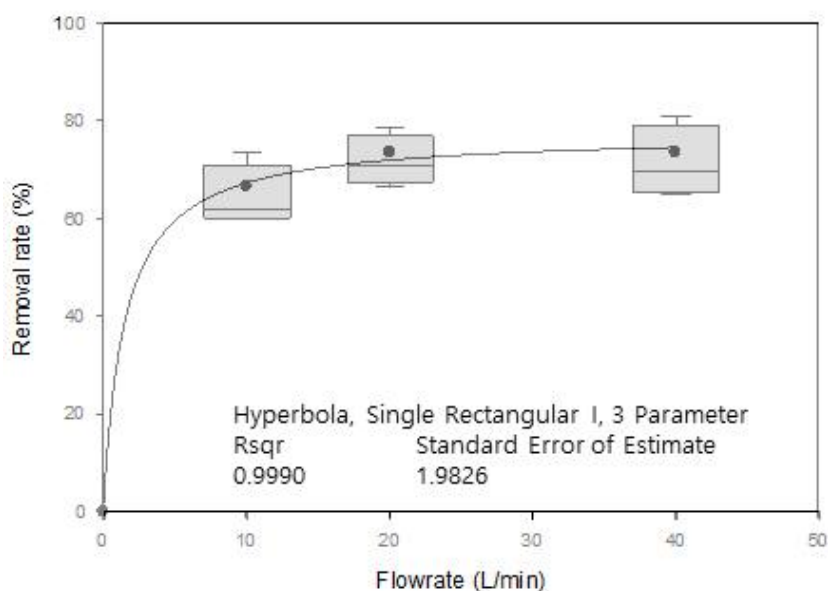


그림 16. Removal efficiencies of suspended solid using the cyclone decanter according to the flowrate with real wastewater ranged from 320 ~ 3,000 mg/L. Regression was accomplished by Hyperbola, Single Rectangular I, 3 Parameter, Sigma Plot.

표 9. SS concentration of inflow/ outflow at the decanter with real wastewater ranged from 320 mg/L to 3,000 mg/L.

Flowrate(m <sup>3</sup> /hr)		Control(0)	0.6	1.2	2.4
Sample (mg/L)	1	3000	800	640	570
	2	1200	480	360	320
	3	1580	570	450	540
	4	1200	480	400	420
average (mg/L)		1745	583	463	463
removal rate (%)			66.6	73.5	73.5

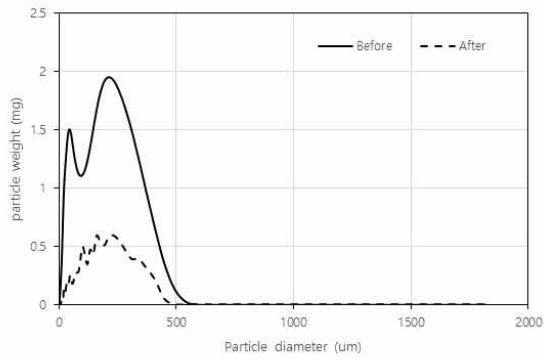
그림 14, 15, 16에서 보여지는 바와 같이 합성폐수와 같이 유출유량이 1.2 m<sup>3</sup>/hr에 가까이 근접하면 유량이 증가해도 부유입자의 침강량은 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다. 본 실험에서 확보된 최적 유량에서 부유입자의 제거량은 각각 약 73%, 70%와 74%로 나타났다. (표 7, 표 8과 표 9) 상한을 갖는 지수증가 곡선식을 사용해 유량별 계산된 제거효율의 평균값과 유출 유량의 상관관계를 분석하였으며 R값은 0.998이상, 평균 상한 제거효율은 약 72 %로 계산되었다.

실 폐수에서 부유입자는 합성폐수에 사용된 clay 조다 입도분포가 상당히 넓은 영역으로 분포되고 있고 사이클론 디켄터에 의한 부유입자의 제거효율이 입도분포와 상관관계가 적지 않은 것을 고려하였을 때, 입자의 직경과 제거 양상을 확인하기 위해 디켄터 유입수와 유출수의 입자의 입도분포를 분석하여 보았다. 본 실험에서 최적 제어시점은 제거효율이 최대값에 수렴하기 시작하는 부분으로, 유출 유량을 약 2.40 m<sup>3</sup>/hr로 조절하였을 때 최대값에 수렴하는 결과가 도출될 수 있음을 알 수 있었다.

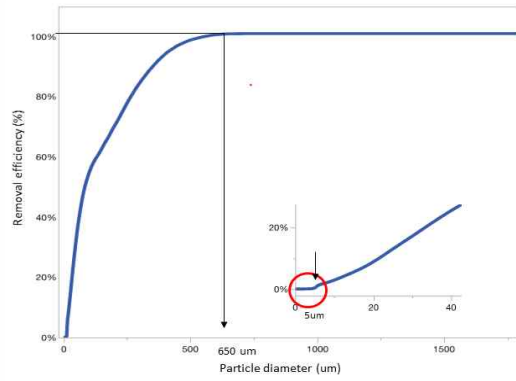
저농도와 중농도 그리고 고농도 실험폐수에서 각각의 입도분포는 각각 다르게 나타났는데 저농도에서는 최대입자의 크기가 약 600 um, 중농도에서는 1,200 um, 그리고 고농도에서는 1,300 um 까지 분포되는 것으로 나타났다 (그림 17). 최대 유속에서 유효입경(effective diameter)은 저농도, 중농도, 고농도에서 650 um, 800 um, 400 um로 관찰되었는데, 이는 활성슬러지 입자의 다양성 (각 입자의 비중이 다를 수 있음)에 근거하는 것으로 판단하였다. 한계입경 (limited diameter)은 세 경우 모두 약 5um 정도로 나타나 작은 콜로이드성 입자들은 본 실험에서 설정된 사이클론의 유속으로 제거할 수 없는 한계치이라고 평가되었다.

사이클론 디켄터를 이용한 실 폐수를 이용한 유효 제거 입경의 계산과 더불어 유입수, 유출수의 주요 수질 항목의 농도를 측정하여 이에 따른 제거효율을 계산하였고, 그 결과를 표 10에 나타내었다. 각 경우 세 번의 시료를 채취하여 평균값으로 제거률을 환산하였다. T-N의 경우 약 4.5 % 제거되었으며, T-P의 경우 평균 1.0 % 가량 제거되었다. COD의 경우 평균 36.5 % 가량 제거되었다. T-N과 T-P의 경우 점토의 특성상 입자성 질소와 인의 함유량이 많지 않고, 용해성 질소나 인의 경우 침전성이 거의 없으므로 사이클론 디켄터의 적용으로 효과적인 제거는 기대하기 어려울 것으로 판단 되었다. COD의 경우 일정 이상의 제거률을 보이는 것은 활성슬러지 입자 중 COD 유발할 수 있는 입자의 제거가 사이클론 디켄터에서 수행되었음을 나

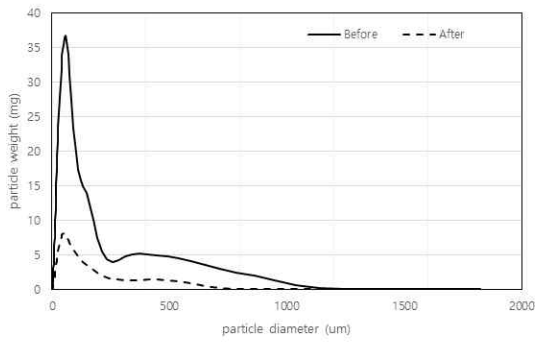
타낸다. 따라서 일부 COD의 제거도 사이클론 디켄터를 사용함으로서 기대할 수 있는 결과이라고 보여진다.



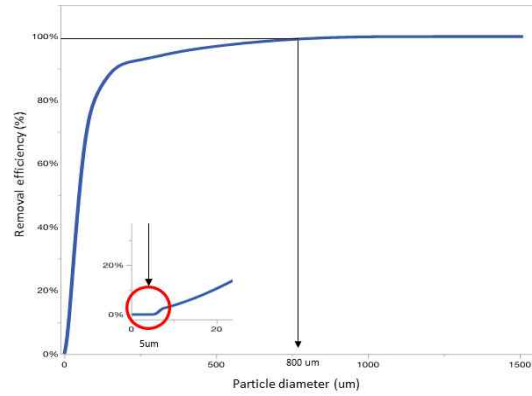
(a)



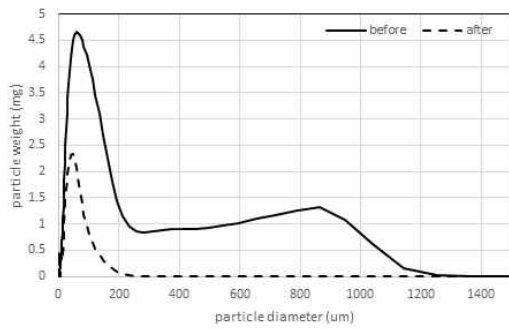
(b)



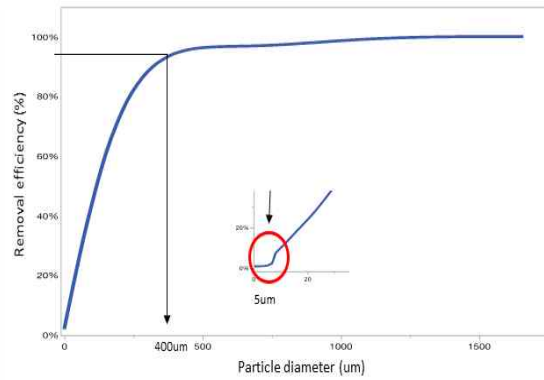
(c)



(d)



(e)



(f)

그림 17. Particle distributions (left side) and accumulated removal amount (right side) of each suspended concentration of the real wastewater in the inflow and outflow of the cyclone decanter. (a and b) low concentration, (c, d) middle concentration, (e, f) high concentration

표 10. Removal of T-N, T-P, COD, and suspended solid of the real wastewater according to the flowrate at the decanter of SBR

Number of Sample	TOTAL NITROGEN (mg/L)		TOTAL PHOSPHORUS (mg/L)		CHEMICAL OXYGEN DEMAND (mg/L)	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
1	1.75	1.58	1.20	1.19	192	80
2	1.61	1.59	1.18	1.18	120	120
3	1.92	1.55	1.19	1.20	104	64
Average	1.65	1.57	1.19	1.19	138.67	88
Average Efficiency	4.5%		1%		36.53%	

SBR 공정에서 운영시퀀스와 하이드로사이클론 운영시퀀스는 입자들의 유출이 일어나지 않도록 관리되어야 한다. 아래 표 11에 예상되는 운영 시퀀스를 제시해 보았다.

표 11. Operation sequence of SBR and hydrocyclone decanter

SBR Sequence		유입	교반	포기	비포기	침전	배출
Time (min)		30	30	120	90	60	30
교반		ON	ON	OFF	ON	OFF	OFF
Blower		OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
Decanter Sequence	TOP outlet	Close	Close	Close	Close	Close	OPEN
	Bottom outlet	Close	OPEN	OPEN	OPEN	Close	Close
	Right Inlet	Close	Close	Close	Close	Close	OPEN



## 제4장 결 론

## 4. 결론

현재까지 하이드로사이클론을 이용한 SBR용 디켄터 개발연구를 통하여 수행된 연구의 결론을 다음과 같다.

1) silver 또는 milky clay를 이용하여 입도분포가 약간은 상이한 합성폐수를 제조하여 사이클론 디켄터를 적용해 부유입자의 침강을 유도하였을 때, 유출 유량을 2.40 m<sup>3</sup>/hr로 조절하였을 때 SS 제거효율은 최대 32.37 % 측정되었으며, 경제성을 고려하여 1.20 m<sup>3</sup>/hr의 유출 유량이 도달하였을 때 최대제거율에 근접하였으므로, 유출유량은 1.20 m<sup>3</sup>/hr로 유지함이 적절할 것으로 판단하였다.

2) 사이클론 디켄터의 유입수와 유출수의 입도분포 곡선의 해석해 보았을 때 유출수의 입경 평균값 및 중앙값 크기 감소와 두 그래프의 면적 차이를 통해 수중 입자상 물질의 제거를 명확히 확인할 수 있었다. milky clay 보다 큰 입도 분포를 가진 (~300  $\mu$ m) silver clay의 경우, 사이클론 디켄터에 의해 콜로이드성 입자의 제거 비율이 높은 것으로 나타났다. 본 실험에서 주목할만한 것은 각 종류의 clay에서 20  $\mu$ m 이하의 입자들의 침전은 거의 나타나지 않았고 (따라서 한계입경은 약 20  $\mu$ m) 한계입경보다 큰 경우 일부분의 제거가 이루어지는 것이 관찰되었으나 100  $\mu$ m보다 큰 입자들의 침전이 원활히 이루어지는 것으로 판단 되었다.

3) 사용한 합성폐수를 사용하였을 때, T-N의 경우 1.30 - 8.04 % 제거었으며 T-P의 경우 0.82 - 2.49%, COD의 경우 10.70 - 12.24% 가량 제거되었으며 SS의 경우는 최소 12.00 ~ 32.37 % 제거되었다. T-N과 T-P의 경우 점토의 특성상 입자성 질소와 인의 함유량이 많지 않아 소폭 제거되었다고 판단하였으며, 용해성 인자들을 사이클론 형식의 디켄터로 제거할 수 있는 한계가 있다고 사료 되었다.

4) 실험 폐수의 경우 유출유량이 1.2 m<sup>3</sup>/hr에 가까이 근접하면 유량이 증가해도 부유입자의 침강량은 크게 증가하지 않고, 확보된 최적 유량 (2.4 m<sup>3</sup>/hr)에서 부유입자의 제거량은 각각 약 73%, 70%와 74%로 나타났다. 상한을 갖는 지수증가 곡선식을 사용해 유량별 계산된 제거효율의 평균값과 유출 유량의 상관관계를 분석하였으며 R 값은 0.998이상, 평균 상한 제거효율은 약 72 %로 계산되었다.

5) 저농도와 중농도 그리고 고농도 실험폐수에서 최대입자의 크기가 약 600  $\mu$ m,

1,200  $\mu\text{m}$ , 그리고 1,300  $\mu\text{m}$  까지 분포되는 것으로 나타났다. 최대 유속에서 유효입경(effective diameter)은 저농도, 중농도, 고농도에서 650  $\mu\text{m}$ , 800  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ 로 관찰되었는데, 이는 활성슬러지 입자의 다양성 (각 입자의 비중이 다를 수 있음)에 근거하는 것으로 판단하였다. 한계입경 (limited diameter)은 세 경우 모두 약 5 $\mu\text{m}$  정도로 나타나 이러한 콜로이드성 입자들은 본 실험에서 설정된 사이클론의 유속으로 제거할 수 없는 한계치이라고 평가되었다.

6) T-N의 경우 약 4.5 % 제거되었으며, T-P의 경우 평균 1.0 %가량 제거되었다. COD의 경우 평균 36.5 % 가량 제거되었다. T-N과 T-P의 경우 점토의 특성상 입자성 질소와 인의 함유량이 많지 않고, 용해성 질소나 인의 경우 침전성이 거의 없으므로 사이클론 디켄터의 적용으로 효과적인 제거는 기대하기 어려울 것으로 판단되었다. COD의 경우 일정 이상의 제거율을 보이는 것은 활성슬러지 입자 중 COD 유발할 수 있는 입자의 제거가 사이클론 디켄터에서 수행되었음을 나타낸다.

본 기술개발을 통해 연속식회분반응기(SBR)의 취약점인 부유물질 관리가 가능한 디켄터의 활용이 가능하다는 것을 확인할 수 있었으나, 기술의 실용화를 위하여 장치의 제품화가 반드시 필요하고, 이는 본 연구의 공동연구기업인 에이치앤티(주)과 협업을 통해 기술의 실용화를 이루고자 한다.

일반적으로 대부분의 오수처리장치에 적용되는 연속식활성슬러지 공정은 침전조가 독립적으로 설치 운영되고 있고, 상등수는 월류벽을 통해 유출되는 형태로 설계되어 있다는 점을 감안하면, 본 기술개발에서 제안하는 사이클론 디켄터가 연속식회분반응기에 국한되어 운용되는 것이 아니라 월류되어 방출되는 침전조를 가지는 연속식 활성슬러지 공정 (CSTR) 상단부에 배치함으로서 장치의 적용이 가능하므로, 대부분의 오수 처리장치에서 부분적 개조를 통해 본 연구에서 개발된 사이클론 디켄터를 운용할 수 있다고 판단된다.

기존의 SBR 디켄터의 유사한 체적에, 부가적으로 원뿔형태의 사이클론이 디켄터 내부에 장치되는 과정이 필요한 점을 감안하면 제작비용의 증감이 (10 ~ 15%) 거의 없으면서도 부유물질의 제거라는 기능이 부가되어 저렴한 비용으로 처리장치의 고도화가 가능하다. 전술한 바와 같이 연속식 활성슬러지 공정 (CSTR)에 확대 적용이 가능한 점을 고려하면 제품의 확장성도 매우 양호하다고 보여진다.

## 참고문헌

1. 2020년 하수도 통계, 환경부  
([https://www.me.go.kr/home/web/policy\\_data/read.do?menuId=10264&seq=7809](https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10264&seq=7809))
2. (사) 한국생활하수처리협회, 2013 KODSTA  
([http://www.kodsta.or.kr/05\\_sub/sub5\\_3.php?mode=view&number=2350](http://www.kodsta.or.kr/05_sub/sub5_3.php?mode=view&number=2350))
3. Bhaskar, K. U., Murthy, Y. R., Raju, M. R., Tiwari, S., Srivastava, J. K., & Ramakrishnan, N. (2007). CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone. Minerals Engineering, 20(1), 60–71.
4. 오종민 & 노성혁. 하이드로싸이클론을 이용한 준설된 퇴적물을 분급 특성. 한국물환경학회지 17.5 (2001) 619–625.
5. Vega-Garcia, D., Brito-Parada, P. R., & Cilliers, J. J. (2018). Optimising small hydrocyclone design using 3D printing and CFD simulations. Chemical Engineering Journal, 350, 653–659.
6. Hoffmann, A. C., De Groot, M., Peng, W., Dries, H. W. A., & Kater, J. (2001). Advantages and risks in increasing cyclone separator length. AIChE journal, 47(11), 2452–2460.
7. Zhang, C., Wei, D., Cui, B., Li, T., & Luo, N. (2017). Effects of curvature radius on separation behaviors of the hydrocyclone with a tangent-circle inlet. Powder Technology, 305, 156–165.
8. CHUAH, T. (2004). Prediction of the effect of dimension, particle density, temperature, and inlet velocity on cyclone collection efficiency. Jurnal Teknologi, 40(F) Jun. 2004: 37–50
9. Xiang, R., Park, S. H. & Lee, K. W. (2001). Effects of cone dimension on cyclone performance. Journal of Aerosol Science, 32(4), 549–561.

## 주 의

1. 이 보고서는 서울녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 서울녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.
4. 본 보고서 내용은 서울녹색환경지원센터에서 주지하는 내용과 다를 수 있습니다.



### 서울녹색환경지원센터

주소 : 서울시 동대문구 서울시립대로 163 서울시립대학교 제2공학관

전화 : 02-6490-5400 팩스 : 02-6490-5407

홈페이지 : <http://sgec.uos.ac.kr>