



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2015년 8월

석사학위 논문

급속응집 시스템을 이용한 합류식 하수도 월류수의 인 제거

조선대학교 대학원

환경공학과

최 임 철

급속응집 시스템을 이용한 합류식 하수도 월류수의 인 제거

Removal of Phosphorus from Combined Sewer Overflow using
Rapid Coagulation System

2015년 8월 25일

조선대학교 대학원

환경공학과

최 임 철

급속응집 시스템을 이용한 합류식 하수도 월류수의 인 제거

지도교수 정 경 훈

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 4월

조선대학교 대학원

환경공학과

최 임 철

최임철의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 최 형 일 印

위 원 조선대학교 교수 신 대 윤 印

위 원 조선대학교 교수 정 경 훈 印

2015년 5월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Tables	iv
List of Figures	vi
ABSTRACT	vii
I 서론	1
II 이론적 고찰	3
1. 비점오염원	3
A. 비점오염원의 개념	3
B. 비점오염원에 의한 유출수 특성	4
2. 비점오염 저감 시설	8
A. 비점오염 저감 시설	8
B. 저류형 시설	9
C. 침투형 시설	10
D. 식생형 시설	10
E. 장치형 시설	10
F. 처리형 시설	11
3. 관형 흐름과 가압부상	12
A. 관형 흐름	12
B. 가압 부상	13
4. 응집 이론	15
A. 전하의 이온층 압축	15
B. 흡착과 전하중화	15

C. Sweep floc coagulation	16
D. 입자간 가교 결합	16
5. 응집제에 의한 인 제거	16
A. 응집제의 종류	17
B. 알루미늄 화합물에 의한 인 제거	19
C. 철 화합물에 의한 인 제거	20
D. 석회에 의한 인 제거	21
III 실험 및 분석방법	23
1. 폐수조건과 응집시약	23
A. 실험 폐수 조건	23
B. 응집시약	24
2. 최적 응집 조건 실험	25
A. Jar test	25
B. 합성폐수를 이용한 jar test	26
C. 실험폐수 비교를 위한 jar test 조건	27
2. 관형반응기 실험	27
A. 관형반응기의 구성	27
B. 관형반응기 실험방법	29
3. 급속응집 시스템 운용 실험	30
A. 급속응집 시스템의 구성	30
B. 급속응집 시스템 실험방법	32
4. 분석 방법	33

IV 결과 및 고찰	34
1. 합성폐수 jar test 실험 결과	34
A. 응집제량 jar test 실험 결과	34
B. pH 결정 jar test 실험 결과	37
C. 응집보조제 결정 jar test 실험 결과	39
2. 합성폐수와 실패수 jar test 결과 비교	42
3. 관형반응기 실험결과	46
A. 합성폐수 실험 결과	46
B. 실패수 실험 결과	47
4. 급속응집 시스템 실험결과	49
V 결론	50
REFERENCES	51

List of Tables

Table 1. Classification and characteristics on the pollutant source. ...	3
Table 2. Classification of combined sewer overflows.	6
Table 3. The pollution level of the non-point pollution sources in the urban area.	7
Table 4. Classification of non-point source control.	9
Table 5. A practical application of plug flow reactor and dissolved - air flotation tank.	14
Table 6. Type of coagulant for suspended soild removal.	17
Table 7. The reagent type of synthetic wastewater used the jar test. ..	23
Table 8. The polution level of synthetic wastewater and influent water of 'S' sewage treatment plant.	23
Table 9. Specifications of plug flow reactor used in experiments.	29
Table 10. Specifications of rapid coagulation system used in experiments.	32
Table 11. Analytical methods and parameters in experiments.	33
Table 12. Effects of dosage amount of PAC on the phosphorus removal and turbidity.	35
Table 13. Effects of pH on the phosphorus removal and turbidity from synthetic wastewater.	37
Table 14. Photograph of coagulation floc through jar test.	39
Table 15. Effects of dosage amount of anion polymer on the turbidity.	40
Table 16. Comparison of before and after using synthetic wastewater and influent water of 'S' sewage treatment plant.	42
Table 17. Effects of dosage amount of PAC on the phosphorus removal and turbidity.	43
Table 18. The plug flow reactor experiment under various flow velocity of synthetic wastewater.	46
Table 19. The P04-P concentration of plug flow reactor experiment under	

various flow velocity of synthetic wastewater. 47

Table 20. The T-P concentration of plug flow reactor experiment under various flow velocity of influent water of 'S' sewage treatment plant. 48

Table 21. The T-P concentration of rapid coagulation system experiment under various flow velocity of influent water of 'S' sewage treatment plant. 49

List of Figures

Fig. 1. A schematic diagram representation of the outflow water caused by non-point pollution sources.	4
Fig. 2. Type of combined sewer overflows in case of rain.	5
Fig. 3. Water treatment system using combination with plug flow reactor and dissolved – air flotation tank.	12
Fig. 4. Photograph of synthetic wastewater and influent water of ‘S’ sewage treatment plant.	24
Fig. 5. Photograph of the jar tester used in experiments.	25
Fig. 6. Photograph of plug flow reactor used in experiments.	28
Fig. 7. Photograph of rapid coagulation system used in experiments.	31
Fig. 8. Effects of dosage amount of PAC on the phosphorus removal and turbidity.	36
Fig. 9. Effects of pH on the phosphorus removal and turbidity from synthetic wastewater.	38
Fig. 10. Effects of dosage amount of anion polymer on the turbidity. ..	41
Fig. 11. Effects of dosage amount of PAC on the phosphorus removal and turbidity.	44
Fig. 12. Compare of the synthetic wastewater and influent water of ‘S’ sewage treatment plant.	45

Abstract

Removal of Phosphorus from Combined Sewer Overflow using Rapid Coagulation System

By: Choi, Im Cheol

Advisor: Prof. Cheong Kyung-Hoon Ph. D

Department of Environmental-Biological Engineering

Graduate School of Chosun University

The aim of this study was to investigate the removal of phosphorus in combined sewer overflow(CSO) using rapid coagulation system(plug flow reactor + dissolved air flotation of waterway variability). jar test and plug flow reactor test were performed to examine the phosphorus removal in synthetic wastewater for optimal operation conditions of rapid coagulation system. For comparison, jar test and plug flow reactor test were also conducted with reality wastewater. Dissolved air flotation of waterway variability was performed to determine the phosphorus removal under optimal operation conditions through the jar test and the plug flow reactor test. Results showed phosphorus removal of 52.43 ~ 98.87 %, indicating that the jar tests under synthetic wastewater were conducted successfully. The optimal phosphorus removal condition of jar test under synthetic wastewater was observed 1% PAC of 1.5 mL/L, pH of 6~7 and anion polymer of 20 mL/L. In the case of reality wastewater, phosphorus removal rate lower than in the case of Synthetic wastewater. The results of plug flow reactor test under various flow rate demonstrated that phosphorus removal increased with increasing flow rate. The dissolved air flotation of waterway variability test results showed phosphorus removal was effective. This study demonstrated that coagulation system(plug flow reactor + dissolved air

flotation of waterway variability) could be used as treatment system for the removal of phosphorus in combined sewer overflow.

이 서 론

비점오염원은 토지표면에 축적된 오염물, 토양의 침식, 흙덩이, 강우유출량의 증가, 대기 중의 오염물질, 부유물질, 용존성 오염물질, 인간의 활동에 의한 오염물 등이 강우에 의해 유출되어 발생한 오염원이다. 그렇기 때문에 비점오염원은 일정한 유출경로가 없는 오염원을 말한다.¹⁾

비점오염원은 오염물질의 유출이 강우 시에 집중적으로 발생하고, 오염지역이 넓게 분산되어 있으며, 강우 초기에 오염물질이 유출되는 초기우수 유출수(first-flush)는 불투수성 도로나 지표에서 퇴적물의 세척으로 인한 오염물과 대기 중의 오염물질을 함유하여 오염물질의 농도가 높고, 도시지역의 경우 중금속 등의 독성물질을 함유 할 가능성이 높다.

강우로 인하여 우수가 하수관거, 빗물펌프장 및 하수처리시설에서 처리되지 못하고 하천이나 수역에 월류되는 하수를 합류식 하수도 월류수(CSOs)라 하며, 그 발생원이 비점오염원의 특성을 지님과 함께 초기우수유출수를 포함하여 높은 오염도를 지니고 있다.

이러한 비점오염원이 미처리된 상태로 방류되면 수계 접촉으로 인한 위생오염과 상수원으로 이용되는 하천의 오염, 호소의 부영양화 등의 피해를 야기한다. 이에 따라 효율적인 수계 환경 보전을 위하여 점오염원의 관리와 함께 초기우수를 포함한 비점오염원에 대한 관리가 필요하다는 인식이 대두되었다.²⁾

비점오염원 관리를 위한 일환으로 저류, 침투, 식생, 인공습지 등을 이용한 자연형 시설과 여과, 와류, 스크린, 응집, 생물학적 처리 방법을 이용한 장치형 시설 등이 저감시설로서 운영되고 있다.

응집·침전을 이용한 장치형 시설은 응집제를 사용하여 응집 후 침전시켜 오염물질을 분리시키는 시설로 고형물에 대한 처리효율이 높고 응집제 종류에 따라 부영양화 물질인 인에 대한 높은 제거율을 볼 수 있어서 오염도가 높은 초기우수를 급속처리하기 용이하다.

이를 적용하여 응집·침전을 이용한 장치 시설로 응집제의 완전혼합을 유도하는 관형반응기와 응집된 플러크와 처리수를 분리하는 가압반응조를 조합한 급속 처리 시스템이 제시되었으나 그 효율에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 합류식 하수도 월류수의 인 처리를 위해 관형반응기와 가

압부상조를 복합한 시스템을 구축하고, 회분실험을 통해 응집 최적 조건을 구하고 시스템 운영 결과를 분석하여 구축한 시스템의 인 제거 효율성에 대하여 검토하고자 한다.

II 이론적 고찰

1. 비점오염원

A. 비점오염원의 개념

오염물질이 발생하는 오염원의 분류는 Table 1에서와 같이 크게 점오염원(point source)과 비점오염원(non point source)으로 구분될 수 있다. 점오염원은 가정하수, 공장폐수와 같이 오염 배출원이 하나의 점(one point)으로 표현될 수 있는 오염원으로 오염물질의 이동경로가 명확하다. 반면에 비점오염원은 토지표면에 축적된 오염물, 토양의 침식, 흙덩이, 강우유출량의 증가, 대기 중의 오염물질, 부유물질, 용존성 오염물질, 인간의 활동에 의한 오염물 등이 강우에 의해 유출되어 발생한 오염원이다. 그렇기 때문에 비점오염원은 일정한 유출경로가 없는 불특정적인 오염원이다.³⁾

Table 1. Classification and characteristics on the pollutant source.

분류	발생원	특 징
점 오염원	공장	농도가 높은 물이 수역의 한 점에서 집중적으로 배출
	사업장	주로 인위 적인 활동이 원인
	도시하수	오염물질의 이동은 파이프나 하수도를 통한
	분뇨처리장	인위적 활동에 따라 변화가 발생
비점 오염원	시가지	오염원을 찾기 어려움
	논	오염원이 넓은 장소
	밭 과수원	수문 현상의 올바른 이해와 적용이 필수
	초지	일반적으로 강수기간 중 빗물과 함께 수역으로 유입
	산지	저농도이나 수량이 많음
건설현장	자연적인 부하량도 포함	
매립지	호소, 저수지의 부영양화에 밀접한 관계	

B. 비점오염원에 의한 유출수 특성



Fig. 1. A schematic diagram representation of the outflow water caused by non-point pollution sources.

강우유출수는 분류식 우수유출수를 말하며 도시지역으로부터 강우 시 비점오염원의 수질오염물질이 섞여 유출되는 빗물 또는 눈 녹은 물을 말한다. 분류식 우수관거를 통하여 유출되는 물이 지표면을 따라 합류식하수도시스템으로 수집, 운반되는 과정에서 오수와 합류되고 최종적으로 우수토실에서 월류되는 미처리 하수로서 부유물질, 유기물질, 유해물질 등의 각종 오염성분들을 포함하고 있어 하천을 오염시키는 원인으로 알려져 있다.

월류수는 장마와 국지성 호우 시 관거 내부에 침전된 퇴적물의 유량증가로 인하여 하수관거에서 하천으로 직접 유입될 가능성을 지니고 있다. 또한 강우 시 유기물질, 세균, 기름성분 및 중금속 등의 유해물질이 다량 포함되어 단시간에 급격한 오염부하를 야기하면서, 하천으로 배출되어 하천수질 및 생태계에 악영향을 미칠 수 있는 문제점을 지니고 있다.

우리나라의 하수도 시스템은 단일 관거 계통으로 오수와 우수를 배제하는 합류식 하수관거로 보편화 되어있으며, 차집시설로 유입되기 이전에 합류식 하수도 시

시스템에서 배출되는 월류수는 강우 시 우수유출수와 오수가 혼합 배출되어 계획오수량의 3배(3Q)로만 차집되어 처리하게 되어 있다. 이로 인해 강우 시 유출수에는 지표 퇴적물의 세척(wash off) 등으로 인해 초기강우유출(first flush)시 상대적으로 고농도의 유기물질, 세균 및 중금속 등의 오염물을 함유하며, 이는 방류수역의 수질오염을 가중시켜 수환경의 여러 가지 측면에서 영향을 미치고 있다.

이러한 합류식 하수도 월류수는 우천 시 하수관거, 빗물펌프장 및 하수처리시설에서 미처리된 상태로 하천이나 공공수역으로 월류 또는 방류되는 하수로서 그 발생원이 비점오염원의 특성을 지니고 있으나 점오염원의 형태로 배출되기 때문에 관거 말단부인 우수지 혹은 우수토실 등지에서 오염부하를 저감하게 되면 강우 시 공공수역의 오염을 관리할 수 있다.

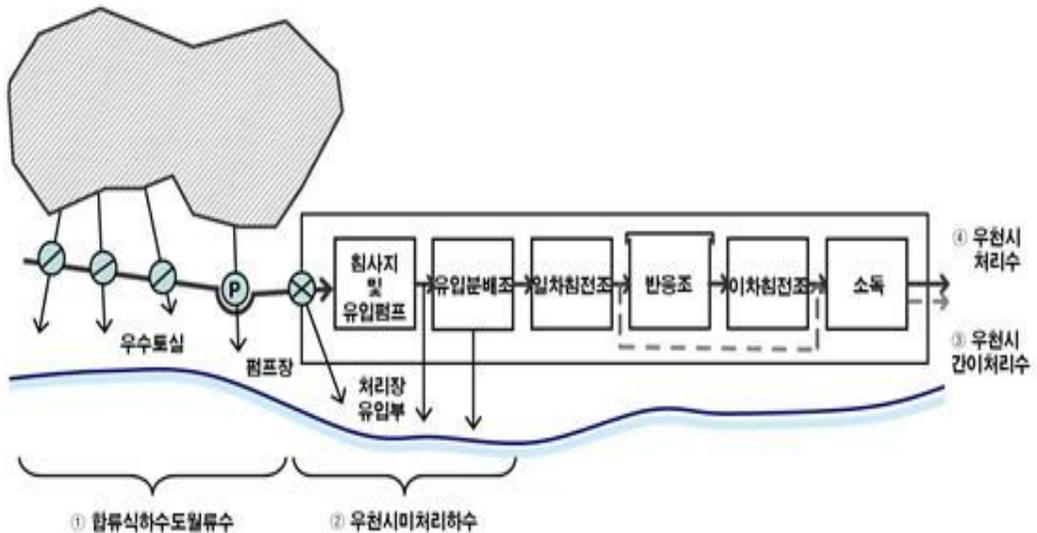


Fig. 2. Type of combined sewer overflows in case of rain.

Table 2. Classification of combined sewer overflows.

구분	정의
<p>합류식 하수도 월류수 (CSO)</p>	<p>합류식 배수구역에서 우천 시 우수토실(구) 및 펌프장에서 차집관(interceptor)을 통해 차집되지 않고 방류수역으로 월류되는 월류수</p> <p>※ 우천 시 차집관의 용량을 초과하여 차집되지 않고 하수관거(Sewer)로부터 월류되는 하수(CSO, Combined Sewer Overflow)</p> <p>※ 월류수는 다양한 오염부하량 삭감 대응 방안, 즉 처리 유·무에 따라 (간이)처리 월류수와 미처리 월류수로 구별할 수 있음.</p>
<p>우천 시 미처리 하수</p>	<p>우천 시 차집관 수집 후 하수처리장 경계면 전·후의 비정상적인 경로를 통해 그대로 처리되지 않고 배출되는 하수</p> <p>※ 우천 시 차집관을 통해 차집된 후 하수처리장 경계면 이전에 비정상적으로 방류되거나 처리장 경계면 내에 유입되었으나 적절한 1차 처리 이상의 처리공정을 거치지 않고 미처리상태로 방류되는 하수로 기존의 by-pass를 의미함</p> <p>※ 현재 하수도시설기준상에는 차집관을 통해 차집되는 하수는 하수처리장으로 전량 유입되어 1차 처리 이상의 단계를 거쳐야 하나, 우천 시 하수처리장의 운영상 문제로 말미암아 처리되지 않고 배출되는 경우가 종종 처리장에서 발생함. 이러한 우천시 미처리 하수는 하수처리장의 문제로 간주하고 관거에서 발생하는 합류식 하수도 월류수에 포함시키지 않음.</p>
<p>우천 시 간이 처리수</p>	<p>우천 시 차집관 수집 후 하수처리시설에 유입, 1차 처리 후 배출되는 방류수</p> <p>※ 우천 시 차집관을 통해 차집된 후 하수처리장에 유입되어 1차 처리를 거친 후에 방류되는 하수. 일반적으로 하수처리장에 유입된 3Q 중 main stream으로 진행되는 1Q를 제외한 나머지 2Q에 해당함.</p>
<p>우천 시 처리수</p>	<p>우천 시 차집관 수집 후 하수처리시설에 유입, 2차 처리 이상을 거친 후 배출되는 방류수</p> <p>※ 우천 시 차집관을 통해 차집된 후 하수처리장에 유입되어 2차 처리 이상의 처리공정을 거친 후에 방류되는 하수. 일반적으로 하수처리장에 유입된 3Q 중 main stream으로 진행되는 1Q에 해당함.</p>

합류식 하수관거 월류수의 성상은 해당 지역의 수문·지형특성과 인문 특성에 따라 매우 다양하게 나타난다. 수문·지형특성으로는 선행강우일수, 강우강도 및 강우 지속시간의 강우 특성, 지형, 식생밀도 등이 해당되고, 인문특성에는 토지이용(가주, 상업, 산업지역), 거리청소주기, 대기오염도, 거리포장형태 등이 주요인자로 구분된다.

또한, 월류수의 오염물질 종류 및 농도는 지역에 따라 그 특성을 달리하기 때문에 항목별 농도간의 편차가 상대적으로 크다. 다음 Table 3는 도시지역 비점오염에 의한 오염도에 대한 연구결과를 비교한 것이다.⁵⁾

Table 3. The pollution level of the non-point pollution sources in the urban area.

출처	SS	BOD	COD	T-P	T-N
서울시 (2002)	482~1236 (719)	245~590 (372)	236~1302 (713)	5~54 (23)	32~147 (86)
Whipple et al.(1976)	-	40.2 (29.2~51.1)	- (201~310)	3.3 (1.1~5.5)	8.03 (6.9~9.1)
Cemola et al.(1979)	1701 (730~4792.5)	76.7 (54.8~84.)	-	1.83 (1.1~5.1)	8.4 (3.29~17.9)
Sonzogni et al.(1980)	1460 (620~2299.9)	-	-	0.88 (0.40~1.31)	6.17 (5.0~7.3)
Wanielista et al.(1981)	460	50	-	2.01	8.4
和田安産(1983)	686~1916	84~339	113~259	1.5~2.6	1.1~41.0
임봉수(1984)	831.1	319.7	690.6	-	-
최의소 외(1991)	854.1	270.1	1226.4	32.0	157.0
國松(1992)	770.2	150.7	222.7	5.62	45.3
최지용(1995)	929.0	313.6	388.7	7.66	49.98

2. 비점오염 저감 시설

A. 비점오염 저감 시설

비점오염저감시설은 시행규칙 제8조 별표 6에서 정하고 있으며 크게 자연형과 장치형 시설로 구분된다. 자연형 시설은 저류시설, 인공습지, 침투형 시설, 식생형 시설 등이며, 장치형 시설은 여과형 시설, 와류형 시설 스크린형 시설, 응집침전 처리형 시설, 생물학적 처리형 시설 등으로 구분하고 있다.⁵⁾

1) 자연형 시설

- 저류시설 : 강우유출수를 저류하여 침전 등에 의하여 비점오염물질을 줄이는 시설로 저류지·연못 등을 포함한다.
- 인공습지 : 침전, 여과, 흡착, 미생물 분해, 식생 식물에 의한 정화 등 자연상태의 습지가 보유하고 있는 정화능력을 인위적으로 향상시켜 비점오염물질을 줄이는 시설을 말한다.
- 침투시설 : 강우유출수를 지하로 침투시켜 토양의 여과·흡착 작용에 따라 비점오염물질을 줄이는 시설로서 유공포장, 침투조, 침투저류지, 침투도랑 등을 포함한다.
- 식생형시설 : 토양의 여과·흡착 및 식물의 흡착작용으로 비점오염물질을 줄임과 동시에, 동·식물 서식공간을 제공하면서 녹지경관으로 기능하는 시설로서 식생여과대와 식생수로 등을 포함한다.

2) 장치형 시설

- 여과형 시설 : 강우유출수를 집수조 등에서 모은 후 모래·토양 등의 여과재를 통하여 걸러 비점오염물질을 줄이는 시설을 말한다.
- 와류형 시설 : 중앙회전로의 움직임으로 와류가 형성되어 기름·그리스 등 부유성 물질은 상부로 부상시키고, 침전 가능한 토사, 협잡물은 하부로 침전·분리시켜 비점오염물질을 줄이는 시설을 말한다.

- 스크린형 시설 : 망의 여과·분리 작용으로 비교적 큰 부유물이나 쓰레기 등을 제거하는 시설로서 주로 전 처리에 사용하는 시설을 말한다.
- 응집침전 처리형 시설 : 응집제를 사용하여 비점오염물질을 응집한 후, 침강 시설에서 고형물질을 침전·분리시키는 방법으로 부유물질을 제거하는 시설을 말한다.
- 생물학적 처리형 시설 : 전처리시설에서 토사 및 협잡물 등을 제거한 후 미생물에 의하여 콜로이드성, 용존성 유기물질을 제거하는 시설을 말한다.

Table 4. Classification of non-point source control⁴⁾⁻⁵⁾.

관리유형	관리기술 종류
저류형시설	하수관거, 저류연못, 이중목적저류지, 인공습지, 지하저류
침투형시설	침투지, 침투트렌치, 침투도랑, 침투집수정, 투수성 포장
식생형시설	식생여과대, 식생수로
장치형시설	stomfilter, stromceptor, sand filter, swirl 장치, 수유입 장치
처리형시설	초고속응집, 침전시설, 생물학적 처리시설(접촉안정법, 폭기식라군법, 살수여상법, 회전원판법 등)

B. 저류형 시설

저류형 시설은 비점오염원 및 우수유출수의 유출저감을 위한 가장 일반적인 방법 중의 하나이다. 우수저류시설은 일반적으로 유역의 말단부에 설치되어 유역으로부터 유입된 우수를 조절할 목적으로 설치된 지역외 저류시설과 도시 유역 내에 내린 강우가 우수관거, 우수지 및 하천으로 유입하기 전에 물을 일시적으로 저류시켜 유출을 억제하는 지역 내 저류시설로 분류한다.

지역내 저류시설로는 공원, 학교운동장, 광장과 같은 공공시설에 저류시설을 설

치하는 경우와 공동주택의 경우에는 동과 동 사이, 주차장 등에 저류형 시설을 설치할 수 있으며, 단독주택의 경우에도 지상화단이나 대지 내에 소규모 저류시설을 설치할 수 있다. 대부분의 저류시설은 우수 유출수 저감을 위한 목적으로 시작되었으나 발생원에서 우수유출을 저감시킬 경우 비점오염원의 유출저감 또한 발생하므로 비점오염원 저감을 위해서도 효율적으로 활용할 수 있는 시설이다.

C. 침투형 시설

침투형 시설은 우수를 지하로 침투되도록 유도하는 시설로서 주로 지표면이나 지하의 일정공간에 쇄석 등의 다공질 매질을 충전하여 우수를 지표 혹은 지표면보다 얇은 곳에서 불포화지층을 통해 분산 침투시키는 시설로서 환경적으로 가장 바람직한 기법이다.

침투형 시설은 집앞의 뜰, 공원이나 녹지 등을 이용하여 침투율을 증가시키는 방법과 보도나 주차장 같은 불투수면을 투수성이 높은 재료를 이용하여 침투가 가능하도록 하는 방법이 있으며, 또한 빗물이 수로에 흐를 때, 지하로 스며들도록 유도하는 시설로 침투트렌치, 침투집수정, 침투측구 등이 있다.

D. 식생형 시설

식생형 시설은 우수유출수에 의한 피크 유량의 감소와 비점오염원의 저감뿐만 아니라, 동식물 서식공간 제공, 녹지경관 조성 등의 기능도 수행한다. 도시지역에서의 식생은 불투수성지역을 감소시키고 우수유출수의 침투 및 고형물 포획 효과의 기능이 있다. 이들은 다른 물리적 방법에 의해 집주어리되기 전에 우수유출수로부터 부유 고형물의 제거하기 위한 전처리 방법으로도 적합하다. 일반적으로 사용되는 식생처리방법은 식생수로와 식생여과대가 있다.

E. 장치형 시설

우수 유출수에 포함된 오염물질을 제거하기 위하여 물리화학적 장치를 이용하는 관리기술로서 스크린, 모래 등을 이용한 여과형, 장치 등으로 개발하여 상품화된

제품 등이 있다.

F. 처리형 시설

각종 하수처리형 시설은 에너지 소모적이고, 비용이 비싸므로 이러한 시설을 이용해 비점오염원을 처리하는 방법은 대부분 비경제적이다. 그러나 개발된 지역의 경우에는 우수유출수에서 오염물을 제거하기 위한 방법으로 하수처리형 시설을 설치하여 직접 처리하는 방법도 가능하다.

특히 합류식 하수관거의 초기우수 월류수는 오염도가 상당히 높으므로 처리되어야 하고, 분류식 하수배제시스템을 가진 도시의 경우도 우수관거가 상수원과 같은 중요한 수역으로 직접 유입되는 경우, 초기우수를 처리하는 것이 바람직한 경우가 많다.

우수 유출수의 발생은 매우 불규칙적이기 때문에 처리시설 규모는 장기간의 시뮬레이션과 통계적인 평가를 거친 후 결정되어야 한다. 처리시설의 규모는 초기유출수를 차집하여 처리할 수 있는 규모와 일정확률강우량의 유출수를 처리할 수 있는 규모로 설치하는 경우의 두 종류가 있다. 처리방법은 크게 물리화학적 응집침전처리, 물리생물학적 방법이 적용되고 있다^{1)~5)}.

3. 관형흐름과 가압부상

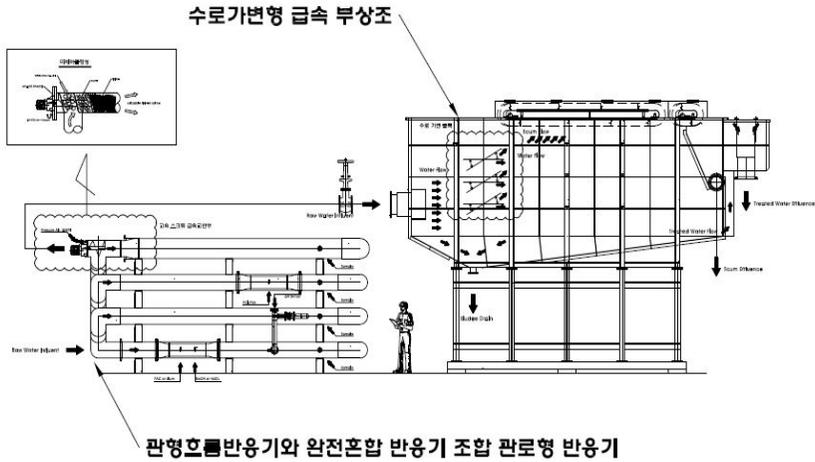


Fig. 3. Water treatment system using combination with plug flow reactor and dissolved - air flotation tank.

A. 관형 흐름

반응기는 유체의 흐름 형태에 따라서 크게 완전 혼합 흐름 반응기(CMFR : Completely Mixed Flow Reactor)와 관형 흐름 반응기(PFR : Plug Flow Reactor)로 나눌 수 있다. 반응기는 유체의 흐름 형태에 따라서 유체의 체류 시간이 결정되고, 반응형태에 따른 변환 및 분리 시에 걸리는 시간 또한 결정된다. 극단적인 흐름 조건하에서는 반응기 내의 모든 유체는 동일한 시간을 소비하고 물질이동은 오직 이류에 의해서만 발생한다. 이러한 형태를 이상적 관형흐름이라고 한다. 또 다른 극단적인 혼합 조건에서, 반응기는 무한한 확산이 일어날 수 있도록 균일하게 혼합된다. 이런 조건을 완전혼합이라고 말하며, 반응기 내부의 유체의 체류시간은 이론적으로 제로(0)에서 무한대까지 변화하게 된다.

완전혼합흐름 반응기에서는 유입 반응물이 빠르게 희석되고, 유입량과 농도가 시간에 따라 천천히 변하는 두 가지 특징을 가지고 있는 반면, 관형흐름 반응기에

서는 반응기 내 유체의 속도가 균일하며, 반응기 내에서 각각의 유체원소가 소요되는 시간은 동일하다는 특징을 가지고 있다. 동일한 반응조건하에서 관형흐름 반응기는 완전혼합흐름 반응기보다 처리효율이 높은 장점이 있다.⁶⁾

B. 가압 부상

공기 부상(dissolved-air flotation, DAF) 공정은 높은 압력으로 물에 공기를 충분히 용해시켜 이를 처리하고자 하는 원수에 주입시키면, 수중에서 다시 감압된 물은 과포화 된 만큼의 공기가 미세한 기포로 형성되어 처리수 중의 플록과 결합한다. 기체의 용해도는 Henry의 법칙에 따라 압력이 증가함에 따라 증가하게 되는데 system으로 유입된 처리수는 압력 펌프에 의해 생성되는 높은 압력 하에서 가압조에 포화된다. 이 가압수를 부상조로 유입시키면 갑작스런 압력의 감소로 인해 평균 입경 80 μm 혹은 그 이하의 미세한 기포로 발생하게 된다. 이 기포가 부상조 내부에서 콜로이드 상태 또는 응집으로 형성된 플록들과 결합하여 수표면으로 상승하여 고액분리가 달성되는 방법이다. 이 기술은 북유럽을 중심으로 널리 적용되고 있으며 정수처리 시스템에서 최종 공정인 여과의 전처리 공정으로 기존의 침전공정을 대체할 수 있는 효과적인 대안으로 부상하고 있으며, 특히 저탁도, 부식질(humic substances) 또는 자연적인 색도나 조류 등을 함유한 원수의 처리에 유용한 공정으로 알려져 있다.^{7)~10)}

Table 5. A practical application of plug flow reactor and dissolved - air flotation tank.



4. 응집 이론

수중에는 유기물과 미생물을 포함하여 미세한 물질들이 부유하고 있다. 이 물질들을 흔히 colloid성 물질이라 칭하며 이들 물질은 겉보기 비중이 물과 비슷하며 같은 전하를 갖고 있어 쉽사리 침전되지 못하고 물속에 장시간 잔류 하는 경향을 가지고 있다. 이들 물질들은 제거하기 위해서는 colloid성 물질이 가지고 있는 전하와 반대되는 전하를 갖는 응집제[Al₂(SO₄)₃, Na₂Al₂O₄, FeCl₃, FeSO₄, Fe₂(SO₄)₃]를 투여하여 물질간의 반발력을 최소화 시켜 서로 응집할 수 있는 조건을 만들어 주어야 한다. 이 과정을 불안정화(destablization)라 하며 불안정화 된 입자들이 서로간에 충돌에 의해 뭉치는 과정(flocculation)을 포괄적인 개념으로 응집(coagulation)이라하며 불안정화 메커니즘은 다음과 같다¹²⁾.

- a. 전하의 이온층 압축 (Double layer compression)
- b. 흡착과 전하중화 (Adsorption and charge neutralization)
- c. Sweep floc coagulation
- d. 입자간 가교 결합

A. 전하의 이온층 압축

Colloid성 입자들은 같은 전하를 갖고 있어 정전기적 반발력에 의하여 수중에 부유하게 되는데 이때 입자와 반대되는 이온이 증가하게 되면 정전기적 반발력이 감소하여 표면의 전위차는 감소하게 되고 Van der waals 인력에 의해 입자들이 서로 압축된다¹¹⁾.

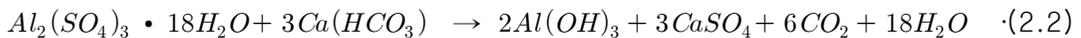
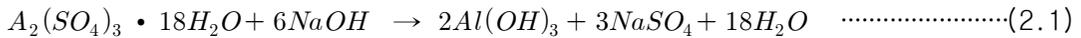
B. 흡착과 전하중화

Colloid성 입자와 반대되는 전하의 응집제를 투여 하면, 응집제 속의 금속이온들은 colloid성 입자 표면에 흡착된 상태가 된다. 흡착력은 응집제와 용매의 상호작용, 응집제의 화학적 친화력, 응집제 표면의 chemical groups에 기인한다¹²⁾. 이때 피흡착제는 colloid성 입자와 반대되는 전하를 갖고 있으므로 이 전체의 입자

들은 표면전하가 중화되며 그에 따라 정전기적 반발력이 사라져 자유로운 접촉이 일어나게 된다.

C. Sweep floc coagulation

Alum이나 철염 같은 금속염이 수중에 용해되면 수중의 OH^- 와 반응하여 수산화 침전물이 형성된다. 이 침전물은 수중의 colloid성 입자들을 둘러싸게 되며 상호간 충돌에 의해 floc이 형성된다. 황산알루미늄이 수중에 들어갔을 때 알칼리 성분과 반응하는 반응식은 다음과 같다.



(2.1)식과 (2.2)식에서 생성된 수산화알루미늄[Al(OH)₃]은 물속에 장시간 체류하면 gel화 되어 floc이 형성된다. 형성된 floc에 colloid성 입자들이 계속해서 붙고 물보다 비중이 무거워지면 침강하게 되는데 이러한 과정을 sweep 응집이라 한다.

D. 입자간 가교 결합

수중에서 sweep 응집이 일어나면 여러 개의 colloid성 입자군이 형성되는데 이러한 입자군이 서로 접촉하여 무거워져서 침전되는 것을 의미한다.

이처럼 colloid성 물질은 4단계 메커니즘에 의해 이루어진다.

5. 응집제에 의한 인 제거

수중의 인을 화학적으로 제거하기 위해서는 다가 금속염과 같은 응집제를 투입하여 용해되지 않는 인산염을 형성시켜 제거하는 방법과 석회를 이용한 결정화함으로써 제거하는 방법이 있으며, 흔히 사용되는 금속염에는 황산알루미늄

[Al₂(SO₄)₃]과 염화제이철(FeCl₃ · 6H₂O) 등이 있다^{12)~14)}.

A. 응집제의 종류

응집제의 종류는 Table 6에 나타난 바와 같으며, 황산알루미늄(Alum), 폴리염화알루미늄(poly Aluminum chloride, PAC) 등의 알루미늄 염이 주로 사용된다. 그 밖에 황산제일철, 황산제이철, 염화제이철 등의 철염과 응집효율을 높이기 위해 여러 가지 유기고분자응집제(polymer)를 사용하기도 한다^{15)~16)}.

Table 6. Type of coagulant for suspended soild removal.

응집제	화학식	용해도 (%)
고형황산알루미늄	Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18H ₂ O	65.3 ~ 78.8
액체황산알루미늄	Al ₂ (SO ₄) ₃ 용액	-
폴리염화알루미늄	[Al ₂ (OH) _m A _{6-m}] (m = 2 ~ 4)	-
암모늄백반	Al ₂ (SO ₄) ₃ (NH ₄) ₂ · SO ₄ · 24H ₂ O	9.5 ~ 20.0
칼륨백반	Al ₂ (SO ₄) ₃ · K ₂ SO ₄ · 24H ₂ O	7.6 ~ 16.6
황산제일철	FeSO ₄ · 7H ₂ O	37.5 ~ 60.2
황산제이철	Fe ₂ (SO ₄) ₃	大

1) 황산알루미늄 (Aluminum sulfated : Al₂(SO₄)₃ · χH₂O)

흔히 Alum 또는 황산반토라 불리는 황산알루미늄은 수산화알루미늄과 황산으로부터 제조된다. 고상 혹은 액상으로 존재하며, 고상은 백색 내지 미황색의 미세한 입자 또는 작은 결정성 덩어리로 산화알루미늄(Al₂O₃) 함량이 16% 이상이고, 액상은 8% 이상이다. 고상으로 사용할 경우에는 사용 전에 희석하여 사용하여야 하는 번거로움이 있고 정량 투입이 용이하지 않기 때문에 취급이 용이한 액상 황산알루미늄을 주로 사용한다.

수중의 대부분의 현탁물질과 부유물질에 대하여 응집반응을 일으키고, 결정은 부식성이나 자극성이 없어 취급이 용이하며, 독성이 없어 대량 주입이 가능하여

널리 사용된다.

적정 응집범위가 좁아 고 탁도나 저 수온 시 등에 알칼리제, 응집보조제를 병용함으로써 처리효과 상승시킬 수 있다. 단 액체 황산알루미늄은 겨울철에 산화알루미늄 농도가 높으면 결정이 석출되어 송액관을 막히게 하는 예가 있으므로 사용에 주의를 요한다.

2) 폴리염화알루미늄 (PAC, Poly Aluminium Chloride : $[Al_2(OH)_nCl_{3-n}]_m$)

PAC는 염기성 알루미늄 중합체로 무색 내지 옅은 황갈색의 액체이며, 중합정도에 따라 염기도가 상이하고 제조공정에 따라 특성이 다양하다. 산화알루미늄 (Al_2O_3) 함량은 10~18% 이며, 염기도는 35% 이상이다. Al 다핵 착이온을 다량 함유하여 부유물질에 대한 전기적 중화능력과 애가교작용이 Alum보다 우수하며, Alum 주입시 발생하는 알칼리도 및 pH 저하 현상이 적어 최적응집 pH 범위가 넓고 수온이 낮아도 사용할 수 있다.

탁월한 응집능력 때문에 국내 정수장에서 널리 사용하고 있으나, 안정성이 길지 않다는 단점이 있다.

3) 황산제일철 응집제 (Ferrous sulfate : $FeSO_4$)

인이나 약취 제거에 주로 사용되면 액상 혹은 고상으로 존재한다. 황산제일철을 제조하는 원료로 사용되고 대개 5%(Fe)로 수송되며 그 이상의 농도에서는 $Fe(SO_4) \cdot 7H_2O$ 와 같은 결정을 만든다. 황산제일철은 용액의 농도가 낮아 수송에 불리하고 취급이 까다로운 단점이 있다.

4) 황산제이철 응집제 (Ferric sulfate : $Fe_2(SO_4)_3 \cdot \chi H_2O$)

회색 내지 백색의 분말 또는 결정으로, 지하수의 정수처리에 효과적이고 다른 응집제와 혼합하여 많이 사용된다.

생성된 침전은 무거워서 침강속도가 빠르고, 적정응집 pH 범위는 pH 8~11로 높다.

5) 염화제이철 (Ferric chloride : FeCl₃)

철염 중 가장 범용적으로 사용되고 있는 응집제로, 황갈색 내지 오렌지색 액상으로 공급하여 수처리에 이용된다.

침전이 무거워 침강성이 좋고, 색도, 황화수소, 에멀전, 망간 등의 제거가 가능하며, 가격이 저렴하여 경제적이고 농도가 높아 수송비도 적게 드는 장점이 있다. 하지만 부식성이 매우 강하고, 휴민질 등에 대하여 철 화합물을 생성하여 제거가 어려우며, 처리 후 잔류색을 유발할 수 있는 단점이 있다.

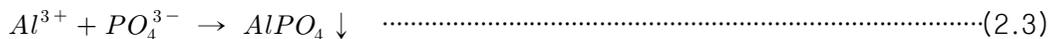
6) 폴리황산규산알루미늄 (PASS, Poly Aluminium Silicate : Al_a(OH)_b(SO₄)_c(SiO₂)_d(H₂O)_x)

PASS는 캐나다에서 개발된 무기고분자응집제로서 투명한 액체로 산화알루미늄 (Al₂O₃) 함량은 8%이다. Si를 함유하면서 분자량이 100,000 ~ 300,000에 이른다. Si를 포함하고 있으므로 침전성과 미세 탁질의 제거효과가 우수한 것이 특징이다.

온도의 영향을 적게 받아 추운 겨울철에 응집성능이 뛰어나고, 넓은 pH에서 최적응집 성능을 나타낸다. Si의 첨가로 침전이 무거워져 유기물의 제거능력과 침강성 등을 상당히 개선시킬 수 있고, 적은 사용량으로 좋은 응집효과를 얻을 수 있다.

B. 알루미늄 화합물에 의한 인 제거

Al³⁺이온에 의해 PO₄³⁻이 제거되는 응집 식은 다음과 같다.



(2.3)의 반응은 1 mole의 Al³⁺과 1 mole의 PO₄³⁻의 반응이고, 27 g의 알루미늄과 95 g의 인산염이 반응하여 122 g의 AlPO₄를 형성한다. 반응하는 Al : P의 중량 비는 0.87 : 1이다¹⁵⁾.

알루미늄 화합물 중 흔히 사용되는 응집제는 황산알루미늄이며 분자식은

$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ 로 구성되어 있으며 그중에서 용해성 알루미늄이온(Al^{3+})이 차지하는 비율은 9.1%이다¹³⁾. 황산알루미늄에 의해 인산염이 제거되는 반응식은 다음과 같다.



(2.4)의 반응은 1 mole의 황산알루미늄은 2 mole의 인산염과 반응하여 2 mole의 $AlPO_4$ 이 생성되고 Alum : P의 중량 비는 9.6 : 1이다. 하지만 실제 공정에서는 이론적 응집제 요구량보다 더 많은 응집제가 요구되며 그만큼 슬러지 생성량도 증가된다¹⁸⁾. 또한 인산염의 제거는 pH 5.5 ~ 6.5에서 제거율이 높으므로 pH가 낮은 하수에 사용할 때는 알칼리성유기고분자(polymer) 및 응집보조제 [$Ca(OH)_2$, Na_2CO_3 , Na_2SiO_3]등을 이용하여 적절히 조절해야 한다¹³⁾.

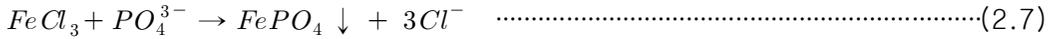
(2.3)식의 반응에서는 pH와 알칼리도가 감소하는 반면 (2.4)식의 반응에서는 pH와 알칼리도가 상승한다. Alum에 의한 인 제거율은 pH에 의해 좌우되며 pH 5.5 ~ 6.5에서 용해도가 가장 낮아 수중에 용해되지 않은 인산염의 양이 많아져서 인 제거율이 높아지게 된다. 겔보기 반응은 단순하지만 실제 운전에서 있어서는 경제적인 반응, 평형상수, 알칼리도, pH 및 미량물질 등에 의한 영향 등을 고려해야 한다¹⁸⁾.

C. 철 화합물에 의한 인 제거

도시 폐수중 상당량의 인을 제거하는 $FeCl_3$ 은 Alum의 인 제거 메커니즘과 비슷한 방법으로 인을 제거한다. Fe^{3+} 이온은 ortho 인산염과 반응하여 인산 제2철($FePO_4$)과 같은 침전물을 발생시키며 Fe^{2+} 이온 또한 ortho 인산염을 제거시킨다. 철 화합물에 의한 인 제거는 pH 의존성이 강하며, pH 4.5 ~ 4.8에서 인의 제거가 가장 활발하게 일어난다¹⁹⁾.

$FeCl_2$, $FeCl_3$, $FeSO_4$, $Fe_2(SO_4)_3$ 와 같은 철 화합물들이 응집제로 사용된다. Fe^{2+} , Fe^{3+} 은 수용액 중에서 $Fe(OH)^{2+}$, $Fe(OH)_2^+$, $Fe(OH)_4^-$, $Fe_2(OH)_2^{4+}$ 등의 여러 형태의

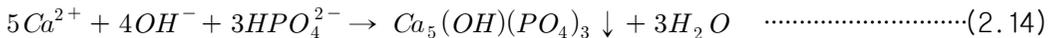
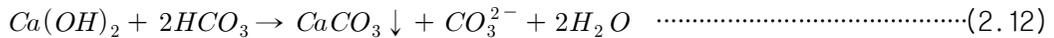
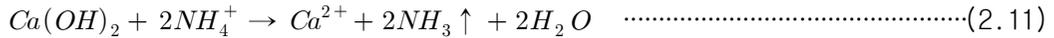
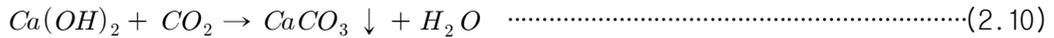
hydroxo complex 침전물을 형성한다. 이 침전물은 응집과 sweeping floc과정을 통해 인산염을 제거한다. 철 화합물에 의해 PO_4^{3-} 이 제거되는 응집 식은 다음과 같다²⁰⁾.



(2.7)식은 염화 제2철($FeCl_3$)에 의해 인산이온이 제거되는 전형적인 반응이다. 철 화합물 역시 수중에 존재하면 $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$ 등의 여러 가지 수산화철 형태로도 결합하며, 이론적 Fe : P의 mole비는 1:1이고 $FeCl_3$: P의 중량 비는 5.2 : 1 이나 (2.8), (2.9)식과 같이 실제 메커니즘은 매우 복잡하게 나타난다¹³⁾.

D. 석회에 의한 인 제거

수중에 석회를 첨가하면 중탄산염 알칼리도와 반응하여 탄산칼슘이 생성되며 하수의 pH가 10 이상 올라가며 다음 식과 같이 잉여 칼슘 이온이 인과 반응하여 수산화 인회석(hydroxyapatite)이 생성되어 침전된다²¹⁾.



석회는 보통 $Ca(OH)_2$ 형태로 첨가되며, Low Lime system은 pH 9.5 이하에서, High Lime system은 pH 11.3 이상에서 인을 제거하며 인 제거를 위해 요구되는 석회의 양은 인의 농도보다는 폐수의 총 알칼리도에 의하여 결정된다(총 알칼리도의 1.5배). 금속염에 의한 제거방법 보다 처리비용이 고가이며, 다량의 슬러지가 발생하는 단점이 있다²²⁾.

$\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)^{3-}$ 와 같은 침전물의 용해도는 pH 변화에 따라 pH가 높으면 용해도는 감소하므로 높은 pH에서 높은 제거율을 나타낸다. 석회는 수중의 알칼리도와 반응하여 CaCO_3 를 형성하게 되므로 석회의 소비량은 알칼리도 농도가 높을수록 많아지게 된다²¹⁾.

III 실험 및 분석방법

1. 폐수 조건과 응집시약

A. 실험 폐수 조건

본 실험에서는 하수처리장 월류수와 비슷한 수질특성을 보이는 S하수처리장의 유입수를 바탕으로 실험하였다. jar test에서 응집제 투입량의 적정치를 구하기 위해서 합성폐수로 실험수를 제조하여 사용하였으며, 제조한 합성폐수의 조성시약과 농도는 Table 7와 같다.

Table 7. The reagent type of synthetic wastewater used the jar test.

구분	조성시약
BOD	Glucose(C ₆ H ₁₂ O ₆), Glutamic acid(C ₅ H ₉ NO ₄)
COD	Glucose(C ₆ H ₁₂ O ₆)
T-N	Potassium nitrate(KNO ₃)
T-P	Monopotassium phosphate(KH ₂ PO ₄)
SS	Cellulose(C ₆ H ₁₀ O ₅)

시스템을 운용한 실험에는 합성폐수와 S하수처리장 유입수를 이용한 실험을 병행하였다. 제조한 합성폐수와 S하수처리장 유입수의 수질현황은 Table 8과 같다.

Table 8. The pollution level of synthetic wastewater and influent water of 'S' sewage treatment plant.

(단위 : mg/L, 개/mL)

폐수	BOD	COD	SS	T-N	T-P	대장균군수
합성폐수	200 ± 5	100 ± 2	200 ± 2	40 ± 2	5.0 ± 0.5	-
S하수처리 장 유입수	214.4 ± 27	95.2 ± 18	163.6 ± 39	48.5 ± 10	4.7 ± 2.3	171,802.0

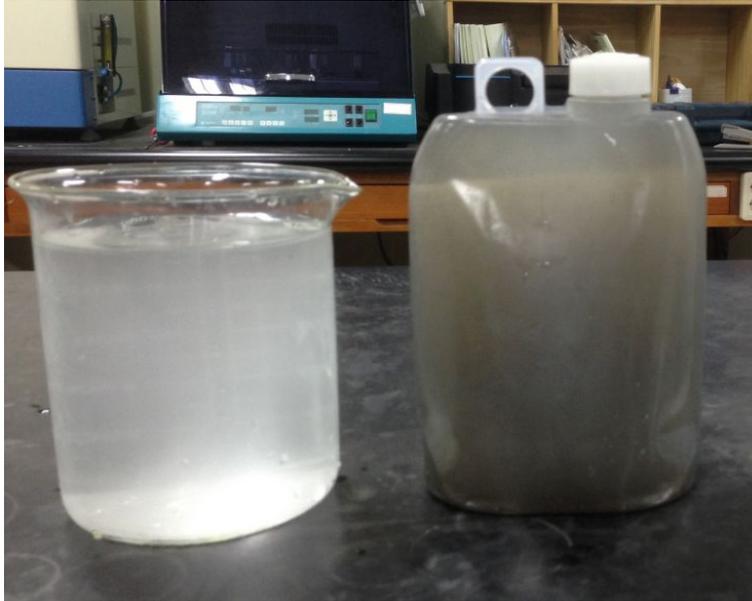


Fig. 4. Photograph of synthetic wastewater and influent water of 'S' sewage treatment plant.

B. 응집시약

실험에 사용한 응집제는 폴리염화알루미늄(Poly Aluminium Chloride, PAC, 삼구 화학공업(주))이며, 실험에 사용할 시에는 Al_2O_3 함량을 1%로 희석하여 사용하였다. 알칼리도는 NaOH 고체시약(Sodium Hydroxide, 순도 98%)과 95% H_2SO_4 용액을 이용하여 1M의 용액을 제조하여 조절하였다. 응집보조제로는 고분자 응집제로 Anion Polymer((주) 청산캠텍, EF-A101)을 이용하여 증류수에 녹여 0.2%로 제조하여 사용하였다.

2. 최적 응집 조건 실험

A. Jar test

Jar test는 Fig. 3와 같은 jar tester(쥬미성과학, SF6)를 사용하여 실험하였다. 원수 1 L를 각각 비커에 채우고, 교반날개(임펠러)의 교반속도를 150 rpm으로 조절하여 단계적으로 결정한 주입량으로 비커 안 원수에 응집약품을 재빠르게 첨가한 후 교반속도 150 rpm의 급속교반을 2분간, 교반속도 20 rpm으로 15분간 완속 교반으로 실시하였다.

이후 30분간 정치한 후 상등수를 사이펀 또는 경사법으로 채취하고, 그 사이 관찰을 통하여 플록형성과 침전상태를 확인하였다. 채취한 시료에 대하여 탁도, pH, 알칼리도 등을 측정하고 플록형성과 침전상태 양부를 종합적으로 판단하여 적정주입량을 결정하였다. 1차 jar test로 좋은 응집 조건을 보기 어려운 경우에는 실험의 주입량 조건을 달리하여 재차 실험하였다²³⁾⁻²⁴⁾.



Fig. 5. Photograph of the jar tester used in experiments.

B. 합성폐수를 이용한 jar test

1) 응집제량 결정 jar test 조건

합성폐수 1 L를 각각의 실험수로 하여 1% PAC를 1 mL씩 단계적으로 1, 2, 3, 4, 5 및 6 mL를 넣어 jar test를 실시한 후 $PO_4\text{-P}$ 분석 및 탁도 측정을 통해 제거율이 방류수 수질기준을 만족하는 주입량 조건을 구하였다. 이 주입량 조건을 포함한 구간을 0.5 mL씩 단계적으로 결정하여 2차 jar test를 실시한 후 $PO_4\text{-P}$ 와 탁도 제거율을 비교해 방류수 수질기준(SS : 10 mg/L 이하, T-P : 0.5 mg/L 이하)을 만족하는 투입량을 구하였다.

2) pH 결정 jar test 조건

합성폐수 1 L를 각각의 실험수로 하고 응집제량 결정 실험에서 결정된 최적 투입량을 동일한 조건으로 하여 실험하였다. 제조한 1M NaOH와 1M H_2SO_4 를 이용하여 pH를 4, 5, 6, 7, 8 및 9로 단계적으로 조정하여 jar test를 실시한 후 $PO_4\text{-P}$ 분석 및 탁도 측정을 통하여 제거율을 산정하였다. 도출된 제거율을 비교하여 높은 제거율을 나타낸 pH를 포함한 구간을 0.5 단위로 세분화하여 재차 jar test를 실시하고 $PO_4\text{-P}$ 분석 및 탁도 측정을 하여 방류수 수질기준에 만족하는 제거율을 나타낸 pH를 구하였다.

3) 응집보조제 결정 jar test 조건

최적 응집보조제 투입량의 결정은 앞선 실험에서 결정한 응집제 투입량, pH 구간을 동일한 조건으로 하여 제조한 0.2%의 음이온폴리머를 5, 10, 15, 20, 25 및 30 mL씩 단계적으로 투입하여 jar test를 실시한 후 응집된 플록 상태와 침전상태를 육안으로 판단하고 탁도 측정을 통해 최적 투입량을 구하였다.

C. 실패수 비교를 위한 jar test 조건

합성폐수를 이용한 jar test 실험 결과를 바탕으로 S하수처리장 유입수와 비교를 위해 실험하였다. 합성폐수 jar test 실험에서 도출한 최적 1% PAC 투입량, pH 구간 조건, 응집보조제 투입량 조건으로 S하수처리장 유입수 1 L에 실험하여 T-P 분석 및 탁도를 측정하여 비교하였다.

3. 관형반응기 실험

A. 관형반응기의 구성

실험에 사용한 관형반응기는 PVC 재질의 파이프를 사용하여 제작되었다. 관의 전체 부피는 10.49 L이며 유량에 따라 체류시간을 조정할 수 있다. 응집제를 유입시켜 접촉하게 하기 위한 관로 7단과 후단 반응조 유입 전 가압처리를 위한 관로 2단으로 총 9단으로 구성되어 있으며, 최상부 관로에서 노즐을 통해 응집제와 pH 조절을 위한 알칼리제를 유입시키고 가압처리 전 최하부 관로에서 노즐을 통하여 응집 보조제를 투입하도록 설계하였다. 응집시약은 정량펌프를 사용하여 균일하게 투입될 수 있도록 하였으며, 처리를 위한 유입수는 시간당 1000 L까지 유입할 수 있는 유량 펌프를 사용하였다.



Fig. 6. Photograph of plug flow reactor used in experiments.

Table 9. Specifications of plug flow reactor used in experiments.

관형반응기의 구성도	
제작 설계인자	
기준	<ul style="list-style-type: none"> 설계유량 : $24 \text{ m}^3/\text{day} = 1.0 \text{ m}^3/\text{hr} = 0.017 \text{ m}^3/\text{min}$ 운전시간 : 24 hr/day 체류시간 : 15~60 sec (적용 20 sec)
제원	<ul style="list-style-type: none"> Specification 200W x 1,500L x 700H, 15A~40A Pipe reactor Material : Body(clean PVC) 및 Bottom support(프로파일)
용량	<ul style="list-style-type: none"> 필요용량 $V = \text{설계유량}(\text{m}^3/\text{min}) / 60(\text{sec}/\text{min}) \times \text{체류시간}(\text{sec}) = 0.006\text{m}^3$ 이상 설비용량 $V_e = \text{배관단면적}(A) \times \text{길이}(L) = 0.25\text{m}^3$ 이므로 만족
부속품	<ul style="list-style-type: none"> 스크류 미세공기 발생장치, Max 3,600rpm PVC

B. 관형반응기 실험방법

1) 합성폐수를 이용한 관형반응기 실험조건

관형반응기에 합성폐수를 유입하고 반응기 유량을 조절하여 유량에 따른 인 제 거 실험을 수행하였다. 앞서 실험한 jar test 최적 응집제 주입량을 바탕으로 응

집제를 주입하여 합성폐수가 관형반응기 내에서 접촉하도록 하고, 관형반응기 통과 유량을 100, 250, 500 및 1000 L/hr로 조정하여 실험하였다. 관형반응기를 10분 정도 운영하여 합성폐수를 통과시키고 통과한 유출수를 5 L 취해 30분간 정치 후 플럭과 분리된 상등수로 PO_4-P 를 분석하여 관형반응기의 인 제거율을 구하였다.

2) 실패수를 이용한 관형반응기 실험조건

관형반응기에 S하수처리장 유입수를 반응기에 유입시켜 유량에 따른 인 제거 실험을 수행하였다. 앞서 실험한 jar test 최적 응집제 주입량을 바탕으로 응집제를 주입하여 S하수처리장 유입수가 관형반응기 내에서 접촉하도록 하고, 관형반응기 통과 유량을 100, 250, 500 및 1000 L/hr로 조정하여 실험하였다. 관형반응기를 10분 정도 운영하여 유입수를 통과시키고 통과한 유출수를 5 L 취해 30분간 정치 후 플럭과 분리된 상등수로 T-P를 분석하여 관형반응기의 인 제거율을 구하였다.

4. 급속응집 시스템 운용 실험

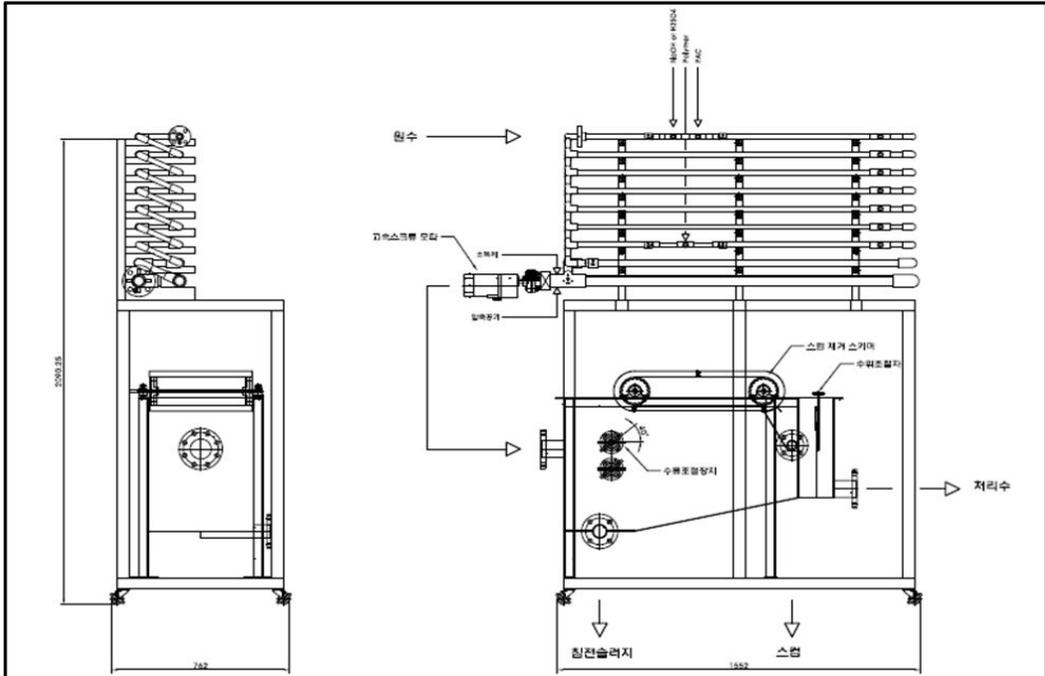
A. 급속응집 시스템의 구성

실험에 사용한 급속응집시스템은 앞서 실험에 사용한 관형반응기를 상부에 두고 PVC 재질의 파이프를 통해 하부에 가압부상조를 연결한 것을 사용하였다. 관형반응기와 가압부상조의 연결 중앙에 스크류 미세공기 발생장치를 이용하여 미세기포를 발생해 부상시키도록 제작되었으며, 가압부상조의 부피는 약 200 L이며, 가압부상을 통해 발생한 스크은 가압부상조 내에 격리된 공간으로 스키머를 이용하여 분리하도록 하였다.



Fig. 7. Photograph of rapid coagulation system used in experiments.

Table 10. Specifications of rapid coagulation system used in experiments.



급속응집 시스템의 구성도

	관형 반응기	가압 부상조
1. Volume	10.49 L	0.25 m ³
2. Quantity	1 SET	1 SET
3. Size	200W x 1,500L x 700H	420W x 998L x 620H
4. Material	Pipe 15A + 25/40A UPVC	Body STS304(2.5T)
	Shell support Al	Incline plate STS304(2.5T)
		Skimer STS304+Rubber
		Skimer chain PP
5. Accessory	pH meter	Air Flow meter (5L/min)

B. 급속응집 시스템 실험방법

급속응집 시스템에 S하수처리장 유입수를 반응기에 유입시켜 유량에 따른 인 제거 실험을 수행하였다. 앞서 실험한 jar test와 관형반응기 실험을 바탕으로 응집

제를 주입하여 유입수와 관형반응기 내에서 접촉하도록 하고, 급속응집 시스템 통과 유량이 100, 250, 500 및 1000 L/hr인 조건하에서 실험하였다. 급속응집 시스템으로 처리한 처리수는 가압반응조 말단에 위치한 웨어를 통해 채수하여 T-P를 분석해 급속응집 시스템의 인 제거율을 구하였다.

5. 분석 방법

본 실험에서의 분석항목 및 분석방법을 Table 11에 나타내었다. 인의 분석은 수질오염공정시험법에 명시 되어있는 인산염인 아스코르빈산환원법으로 실험하였으며 흡광도는 UV-VIS Spectrophotometer (UV-2450, SHIMADZU, Japan)를 사용하여 측정하였다. 탁도는 HF scientific사의 탁도측정기를 이용하여 측정하였다²⁵⁾.

Table 11. Analytical methods and parameters in experiments.

Parameters	Analytical methods
pH	WM-22EP, TOA, Japan
Turbidimeter	HF scientific, US/Micro-TPW, USA
T-P	Ascorbic acid reduction method
PO ₄ -P	Ascorbic acid reduction method

IV 결과 및 고찰

1. 합성폐수 jar test 실험 결과

A. 응집제량 jar test 실험 결과

PAC 투입량을 1, 2, 3, 4, 5 및 6 mL로 수행한 jar test 결과 1 mL 투입량에서 PO_4-P 가 0.56 mg/L로 측정되었고, 그 이상의 투입량 조건에서 PO_4-P 가 측정되지 않았다. SS측정을 위한 탁도 측정에서는 모든 실험 조건에서 99%의 제거효율을 보였다.

상기 실험을 바탕으로 PAC를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 및 3.0 mL로 각각 투입하여 2차 jar test를 실시하였다. 실험 결과 PO_4-P 의 경우 1.5 mL 이상 투입량에서 방류수 수질기준 0.5 mg/L 이하를 만족하는 제거율을 보였으며, 탁도 측정 결과에서는 모든 실험 조건에서 99% 이상의 제거율을 보였다. 이는 최 등²⁶⁾의 응집 보고서에서 보고한 비슷한 인의 농도 응집 실험 조건에서 주입된 응집제량과 거의 같은 Al_2O_3 의 주입함량이다.

Table 12. Effects of dosage amount of PAC on the phosphorus removal and turbidity.

PAC (mL)	PO ₄ -P (mg/L)		Removal ratio	NTU		Removal ratio
	Initial	Final		Initial	Final	
0.5		3.17	42.47%		0.25	99.74%
1		0.56	90.02%		0.22	99.77%
1.5		0	100%		0.31	99.67%
2		0	100%		0.19	99.80%
2.5	5.61	0	100%	96.21	0.27	99.72%
3		0	100%		0.33	99.66%
4		0	100%		0.13	99.86%
5		0	100%		1.53	98.41%
6		0	100%		1.53	99.71%

Fig. 8. Effects of dosage amount of PAC on the phosphorus removal and turbidity.

B. pH 결정 jar test 실험 결과

최적응집제 주입량 실험을 바탕으로 1% PAC 1.5 mL 투입을 동일한 조건으로 하여 최적 pH 결정 jar test를 실시하였다. 제조한 1M NaOH 및 1M H₂SO₄를 이용하여 pH 4, 5, 6, 7, 8 및 9를 단계적으로 조정하고 실험한 결과 pH 5이하에서는 PO₄-P 제거가 거의 이루어지지 않았고 pH 6, 7에서 기준치 0.5 mg/L 이하의 PO₄-P 제거율을 보이다가 pH 8 이상에서 제거율이 다시 낮아졌다. 탁도 측정 결과에서는 pH 6 이상에서 99% 이상의 높은 제거율을 보였다.

상기 실험을 바탕으로 pH 5.5 ~ 8 사이를 0.5씩 조정하여 jar test를 추가 실시하였다. 실험 결과 선행 실험과 마찬가지로 pH 6~7에서 기준치 0.5 mg/L 이하의 PO₄-P 제거율을 보였으며, pH 7.5 이상에서 제거율이 낮아졌다. 탁도 측정 결과에서도 앞선 실험과 마찬가지로 pH 6 이상에서 99%의 높은 제거율을 보였다. 실험결과 적정 pH의 구간은 6 ~ 7로 나타났으며 이는 박 등²⁷⁾, 손 등²⁸⁾의 연구 결과와 같은 구간을 얻었다.

Table 13. Effects of pH on the phosphorus removal and turbidity from synthetic wastewater.

pH	PO ₄ -P (mg/L)		Removal ratio	NTU		Removal ratio
	Initial	Final		Initial	Final	
4		4.74	52.43%		23.4	76.46%
5		4.72	52.68%		16.8	83.14%
5.5		2.82	72.22%		3.29	96.47%
6		0.11	98.87%		0.53	99.47%
6.5	4.99	0.14	98.67%	99.4	0.57	99.39%
7		0.19	98.07%		0.37	99.63%
7.5		0.32	96.85%		0.49	99.47%
8		0.57	94.33%		0.22	99.78%
9		1.57	84.25%		0.12	99.88%

Fig. 9. Effects of pH on the phosphorus removal and turbidity from synthetic wastewater.

C. 응집 보조제 결정 jar test 실험 결과

선행 실험을 바탕으로 1% PAC 최적 투입량을 투입하고 pH 6.5로 조정하여 제조한 0.2% 음이온 폴리머로 최적 응집보조제 주입량 실험을 수행하였다. 응집보조제 투입량 5 ~ 30 mL 구간을 5 mL씩 단계적으로 변화하여 실험한 결과 플럭 상태는 15 mL와 20 mL를 투입한 실험조건에서 양호한 상태를 보였으며 그보다 투입량이 적은 경우 플럭의 크기가 작았고 투입량이 많은 경우는 플럭이 깨져 실의 형태를 띄었으며 색도가 발생하였다. 플럭의 침전 속도는 투입량이 많을수록 증가하였으며 20 mL 이상에서 충분한 침전 속도를 보였다. 탁도 측정 결과는 플럭이 양호한 20 mL를 투입한 실험에서 가장 높은 제거율을 보였다.

Table 14. Photograph of coagulation floc through jar test.

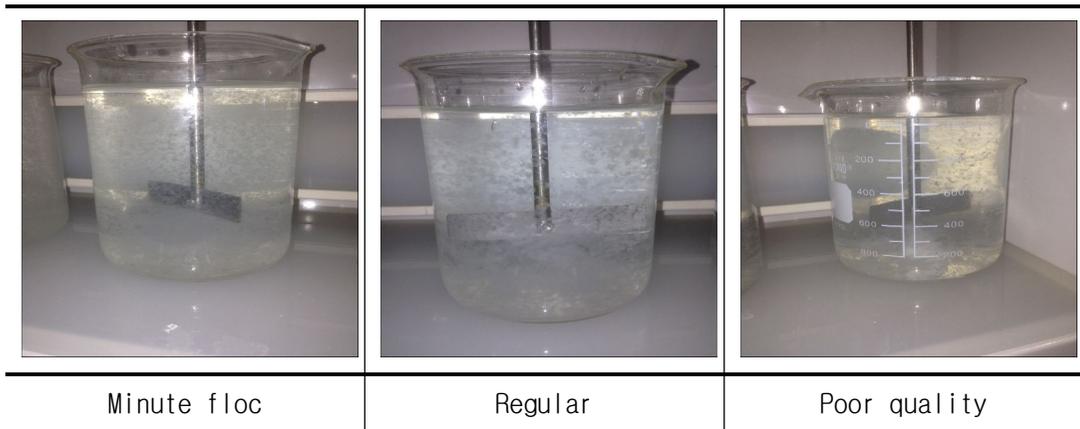


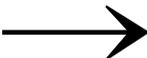
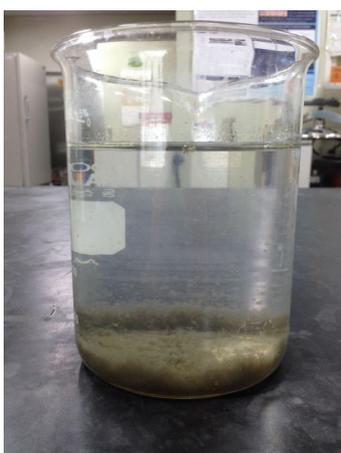
Table 15. Effects of dosage amount of anion polymer on the turbidity.

Polymer (mL)	NTU		Removal ratio
	Initial	Final	
5	98.21	1.00	98.98%
10		3.13	96.81%
15		2.07	97.89%
20		0.45	99.54%
25		10.5	89.31%
30		13.8	85.98%

Fig. 10. Effects of dosage amount of anion polymer on the turbidity.

2. 합성폐수와 실폐수 jar test 결과 비교

Table 16. Comparison of before and after using synthetic wastewater and influent water of 'S' sewage treatment plant.

		
<p>Synthetic wastewater (before)</p>		<p>Synthetic wastewater (after)</p>
		
<p>Influent water of 'S' sewage treatment plant (before)</p>		<p>Influent water of 'S' sewage treatment plant (after)</p>

합성폐수를 이용하여 jar test를 실시한 결과 합성폐수 1 L에 필요한 최적 응집 조건은 1% PAC 1.5 mL, pH 구간 6 ~ 7, 응집보조제(1% 음이온 폴리머) 20 mL 이었다. 이 조건을 바탕으로 S하수처리장 유입수로 jar test를 실시하였다. jar test 실험 조건은 1% PAC를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 및 3.0 mL로 주입하였으며, pH 6.5으로 조절하고 음이온 폴리머 주입량을 20 mL로 하여 동일하게 실험하였다. S하수처리장 유입수로 jar test를 실시하고 상등수로 T-P와 탁도를 측정된 결과는 Table 17와 같다.

Table 17. Effects of dosage amount of PAC on the phosphorus removal and turbidity.

PAC (mL)	T-P (mg/L)		Removal ratio	NTU		Removal ratio
	Initial	Final		Initial	Final	
0.5	3.84	1.44	62.50%	97.3	0.63	99.35%
1		0.43	88.75%		0.48	99.51%
1.5		0.34	91.25%		0.57	99.41%
2		0	100.00%		0.23	99.76%
2.5		0	100.00%		0.31	99.68%
3		0	100.00%		0.34	99.65%

Fig. 11. Effects of dosage amount of PAC on the phosphorus removal and turbidity.

S하수처리장 유입수를 이용하여 jar test를 실시한 결과, 초기 농도 3.84 mg/L에서 방류수 수질기준 이하로 인이 측정된 1% PAC 투입량은 1.5 mL일 때로 나타났다. 탁도 측정결과에서는 모든 조건에서 99% 이상의 제거효율을 보였다.

Fig. 12. Compare of the synthetic wastewater and influent water of 'S' sewage treatment plant.

합성폐수와 S하수처리장 유입수의 jar test 실험결과를 비교한 결과, Fig. 12과 같이 합성폐수를 이용한 PAC 투입량 실험과 거의 같은 제거율 결과를 얻을 수 있었으며, turbidimeter을 이용한 탁도 측정결과에서도 모든 조건에서 99% 이상의 제거율로 합성폐수를 이용한 실험과 같은 결과를 얻었다. 이러한 결과를 바탕으로 합성폐수를 이용한 jar test로 도출된 최적응집조건을 S하수처리장 유입수의 최적응집조건과 같을 것으로 판단하였으며, 이 조건을 바탕으로 관형반응기와 급속응집 시스템의 운용실험에 응집제 투입 조건으로 하였다.

3. 관형반응기 실험결과

A. 합성폐수 실험 결과

Jar test를 통해 얻은 최적응집조건의 응집시약 투입량을 바탕으로 합성폐수와 같이 유입시켜 제작한 관형반응기의 유속에 따른 응집 실험을 하였으며, 이를 위한 관형반응기의 유속에 따른 운전조건은 Table 18과 같다.

Table 18. The plug flow reactor experiment under various flow velocity of synthetic wastewater.

Flow velocity (L/hr)	Sewage influent (mg/L)	PAC (mL/min)	1M NaOH (mL/min)	Polymer (mL/min)
100	1.67	2.5	0.67	33.4
250	3.34	5	1.34	66.8
500	8.3	12.5	3.32	166
1000	16.7	25	6.68	334

관형반응기를 이용한 유속 실험을 수행한 결과는 Table. 19와 같다. 4가지 실험 조건에서 관형반응기를 통과한 직후 채수한 유출수를 분석한 결과에서는 0.7 ~ 1.0 mg/L 정도의 저감 효과를 보였다. 이는 최초 응집제 투입 후 관형반응기의 말단에 오면서 시간 경과에 따른 응집 플러크가 형성되었으며, 이 플러크 형성으로 인한 소량의 수중 인 저감효과로 보인다.

관형반응기를 통과한 유출수를 채수하여 30분간 침전시켜 상등수의 인의 농도를 측정된 결과, 100 L/hr의 실험조건에서는 유입수 5.49 mg/L에서 1.70 mg/L로, 250 L/hr의 실험조건에서는 유입수 5.33 mg/L에서 0.46 mg/L로, 500 L/hr의 실험조건에서는 유입수 5.18 mg/L에서 0.59 mg/L로, 1000 L/hr의 실험조건에서는 유입수 5.22 mg/L에서 0.49 mg/L로 나타났다. 100 L/hr를 제외한 나머지 실험조건에서는 0.5 mg/L 전후 농도로 인이 제거되었으나, 100 L/hr 실험조건에서 1.7 mg/L의 인

이 측정되어 비교적 높은 농도의 인이 잔류한 것을 확인하였다. 이는 100 L/hr 유속 조건은 유량이 관형반응기 내부를 흐르는 데 있어서 충분한 유량으로 유지하지 못하는 차이점을 보였으며, 이러한 영향으로 완전혼합되는 조건을 유지하지 못하여 효율이 떨어진 것으로 보인다.

Table 19. The $PO_4\text{-P}$ concentration of plug flow reactor experiment under various flow velocity of synthetic wastewater.

Flow velocity (L/hr)	Sewage influent (mg/L)	Outflowing water (mg/L)	Sedimentation (mg/L)	Outflowing water pH
100	5.49	4.67	1.70	7.00
250	5.33	4.79	0.46	6.60
500	5.18	4.82	0.59	6.38
1000	5.22	4.89	0.49	6.67

제조한 합성폐수를 응집제와 같이 관형반응기에 통과시켜 유속에 따른 실험을 한 결과, 제작한 관형반응기를 통하여 방류수 수질기준인 0.5 mg/L 정도로 응집효율을 보기 위해서는 250 L/hr 실험조건 이상의 유속을 유지할 필요가 있었으며 이상의 유속 조건에서는 거의 동일한 효율의 제거율을 보였다.

B. 실패수 실험 결과

제조한 합성폐수를 이용한 관형반응기 유속 실험과 동일한 실험조건 하에서 S하수처리장 유입수로 처리수를 달리한 유속 실험을 하였다.

S하수처리장 유입수를 이용한 관형반응기 유속 실험을 수행한 결과는 Table 20과 같다. 4 가지 실험 조건에서 관형반응기를 통과한 직후 채수한 유출수를 분석한 결과에서도 저감효과가 보였으나 0.2 ~ 0.6 mg/L 정도로 합성폐수를 이용한 유

속실험보다 낮게 나타났다.

관형반응기 통과 후 30분간 침전시켜 상등수의 인 농도를 측정된 결과, 100 L/hr의 실험조건에서 4.71 mg/L에서 1.84 mg/L로, 250 L/hr의 실험조건에서 4.87 mg/L에서 0.46 mg/L로, 500 L/hr의 실험조건에서 유입수 4.66 mg/L에서 0.82 mg/L로, 1000 L/hr의 실험조건에서 유입수 4.79 mg/L에서 0.43 mg/L로 나타났다. S하수처리장 유입수를 이용한 실험에서도 100 L/hr의 실험조건에서는 비교적 낮은 인 제거율을 보였으며, 이는 합성폐수를 이용한 유속 실험에서와 마찬가지로 제작한 관형반응기 내에서 유량 부족으로 효율이 떨어진 것으로 보인다.

Table 20. The T-P concentration of plug flow reactor experiment under various flow velocity of influent water of S' sewage treatment plant.

Flow velocity (L/hr)	Sewage influent (mg/L)	Outflowing water (mg/L)	Sedimentation (mg/L)	Outflowing water pH
100	4.71	4.49	1.84	6.74
250	4.87	4.21	0.46	6.7
500	4.66	4.43	0.54	6.3
1000	4.79	4.55	0.43	6.74

S하수처리장 유입수를 이용하여 응집제와 같이 관형반응기에 통과시켜 유속에 따른 실험을 한 결과, 관형반응기 유출 직후의 인 농도에서 차이가 있었으나 응집 플러키 침전되어 분리된 상등수의 인 측정 결과에서는 합성폐수를 이용한 실험에서와 비슷한 인 농도 결과를 얻었다. 또한 합성폐수를 이용한 실험에서와 마찬가지로 250 L/hr 이상의 유속에서 방류수 수질기준에 근접한 인 농도를 보였으며, 이에 제작한 관형반응기의 응집효율을 유지하기 위해서는 250 L/hr 이상의 유속을 유지할 필요가 있을 것으로 보인다.

4. 급속응집 시스템 실험결과

S하수처리장 유입수를 실험수로 하고 유속을 달리하여 관형반응기와 가압부상조로 구성된 급속응집 시스템의 인 제거 효율을 검토하기 위한 실험을 하였다. 급속응집 시스템의 말단 가압부상조를 통과하여 웨어를 통해 유출된 최종 처리수를 분석하였으며 분석 결과는 Table 21과 같다.

Table 21. The T-P concentration of rapid coagulation system experiment under various flow velocity of influent water of S' sewage treatment plant.

Flow velocity (L/hr)	Sewage influent (mg/L)	Outflowing water (mg/L)	Outflowing water pH
250	4.87	0.24	6.7
500	4.66	0.34	6.3
1000	4.79	0.23	6.74

관형반응기와 가압부상조를 조합한 급속응집 시스템을 이용하여 유속을 달리한 실험을 한 결과, 250 L/hr의 실험조건에서 유입수 4.87 mg/L에서 0.24 mg/L로, 500 L/hr의 실험조건에서 유입수 4.66 mg/L에서 0.34 mg/L로, 1000 L/hr의 실험조건에서 유입수 4.79 mg/L에서 0.23 mg/L로 나타났다. 모든 실험조건에서 방류수 수질기준에 만족하는 0.5 mg/L이하의 농도를 보였으며, 관형반응기를 통과한 유출수를 침전시켜 얻은 상등수의 인 농도와 비교하여 급속응집 시스템을 통과한 유출수의 인 농도가 0.2 mg/L씩 더 낮았다. 이는 중력에 의해 침전되지 않는 잔류된 응집 플럭도 가압부상조에서 미세버블에 의해 부상되어 제거된 차이로 보인다²⁹⁾.

V 결론

관형반응기와 가압부상조를 조합한 급속응집 시스템을 이용하여 월류수 내의 인을 제거하기 위해 jar test를 통한 폐수의 응집실험과 시스템 운영실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

$PO_4\text{-P}$ 농도 5 mg/L로 제조한 합성폐수로 jar test를 실시한 결과, 1 L당 1% PAC 1.5 mL, pH 조건 6 ~ 7, 0.2% 음이온 폴리머 20 mL이었으며, 비교를 위한 S하수처리장 유입수의 jar test 실험에서도 거의 동일하게 나타났다.

합성폐수를 이용하여 관형반응기를 통해 유속실험을 한 결과, 250 L/hr의 유속 이상으로 유지하여야 응집효율을 볼 수 있었으며, S하수처리장 유입수를 이용한 실험에서도 같은 결과를 얻었다.

관형반응기의 후단에 가압부상조를 조합한 급속응집 시스템을 유속을 달리하여 운영한 결과, 유입수의 jar test를 바탕으로 응집제를 유입시켜 방류수 수질기준 이하의 인 농도를 얻었으며, 관형반응기 통과 유출수를 침전시킨 처리수보다 높은 인 제거율을 보였다.

REFERENCES

1. 국립환경과학원, 수질오염총량관리를 위한 비점오염원 최적관리지침, 2012.
2. 환경부, 비점오염관리 업무편람, 2006.
3. 최종수, 도시지역 비점오염원의 유출특성 및 저감방안, 2002.
4. Lee Jung Hun, A Study on Treatment of First Flush Rain water for Reducing Non-Point Source Pollution, 석사학위논문, 서울시립대학교(2006).
5. 한국환경정책평가연구원, 비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안, 2002.
6. 황병호 외 5인, Advanced Wastewater Treatment by CMFR and PFR in a Single Reactor, 대한환경공학회, 추계학술연구발표회 논문집, pp. 1843 ~ 1844(2006).
7. 김미정, Dissolved Air Flotation system을 희야원수에 적용하기 위한최적인자의 조건, 박사학위논문, 울산대학교(1997).
8. 김미경, 미세기포 액막 부상법을 이용한 하수 2차 처리수의 인제거 처리에 관한 연구, 석사학위논문, 영남대학교(2011).
9. 김정목, Microbubble 부상분리 시스템을 이용한 하수처리수의 인 제거 효율에 미치는 영향 인자에 관한 연구, 석사학위논문, 영남대학교(2012)
10. 허남주, 마이크로버블을 이용한 용존공기부상법에서 인 제거에 미치는 영향인자에 관한 연구, 석사학위논문, 영남대학교(2011).
11. 김정현, 하수 처리장의 인 제거 효율 향상을 위한 응집공정 연구, 석사학위논문, 경희대학교(2011).
12. Maki, A.W., D.B. Porcella, and R.H. Wendt., The impact of detergent phosphorus bans on receiving water quality, *Water Research*, **18**(7) pp. 893 ~ 903(1984).
13. 박상일, 간헐폭기법에서 알루미늄 부식을 이용한 오수중의 인과 질소 제거, 석사학위논문, 조선대학교(2003).
14. 양해종, 납석을 이용한 하수 중의 인 제거, 석사학위논문, 조선대학교(2015).
15. 환경부, 하수처리시설 총인 처리강화 시범운영 연구, 2009.
16. 낙동강유역환경청, 총인처리시설 기술지원 사례집, 2012.

17. Parker, O.S., de la Fuente, E., Britt, L.O., Spealman, M.L., et al, Lime use in wastewater treatment, EPA-6002-47-038, NTIS No. PB-248181(1976).
18. J.I. Drever, The Geochemistry of natural waters, Prentice-Hall, NJ, pp. 65~ 69(1982).
19. 윤동수, 하수로부터 화학적 인 제거를 위한 철염 응집제 적용 연구, 석사학위 논문, 경남대학교(2013).
20. Culp, R.L., Wesner, G.M and Gulp, G.L., Handbook of advanced wastewater treatment, 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold Co., New York(1978).
21. Black, S.A. Experience with phosphorus removal at existing ontario municipal wastewater treatment plants, Phosphorus Management Strategies for Lakes, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI, pp. 329(1980).
22. Hsu, P. H., Interaction between aluminum and phosphate in aqueous solution, Adv. Chem. Ser. 73, pp. 115 ~ 127(1968).
23. 김홍석, 김성현, The Experimental Study of Predicting Optimum Dosage of PAC Using Jar - Test Results, 대한상하수도학회, Vol.7 No.2, pp. 39 ~ 46(1993).
24. Freese, S. D., D. L. Trollip, and D. J. Nozaic. Manual for Testing of Water and wastewater treatment chemicals. No. 1184/1. WRC Report, 2004.
25. 수질오염공정시험방법, 동화기술편집부, 동화기술, 2013.
26. 부산환경공단, 녹산하수처리장 내 고농도 하수유입에 따른 난분해성 유기물질 저감을 위한 최적 약품 주입 방안에 관한 연구, 2012.
27. Park, Noh-Back, Lee, Bum, Tian, Dong-Jie, Lee, Young-Ju, Jun, Hang-Bae, The Effects of pH and Dosages According to Qualities of Raw Waters and Basicity of Coagulants, Journal of Korean Society of Water and Wastewater, Vol.24, No 5, pp.581 ~ 593, October, 2010.
28. Son, Sang Mi, Jutidamrongphan, Warangkana, Park, Ki Young, Addition of Coagulants for Phosphorus Removal from Combined Sewer Overflows (CSOs), Journal of Korean Society of Water and Wastewater, Vol.26, No 2, pp.295 ~ 302, April, 2012.
29. 유정희, 정수처리 과정 중 부상과 침전 공정의 특성비교에 관한 연구, 석사학위논문, 전북대학교(2001)