

6

하수처리수 재이용을 위한 고속응집침전공정 최적운영 방안 연구



연구총괄	수도연구부장	최영준
연구책임자	물순환연구과장	안재찬
책임연구원	지방환경연구사	김규하
공동연구원	지방환경연구사	한금석
	지방환경연구사	장신요
	지방공업주사보	안봉삼
	지방전기운영주사보	이광섭
	지방보건연구사	신희식
	지방공업연구사	나용운

요 약 문

I . 연구제목

하수처리수 재이용을 위한 고속응집침전공정 최적운영 방안 연구

II . 연구기간

2014. 1. ~ 2014. 12. (12개월)

III . 연구목적

최근 하수처리수를 재처리하여 다양한 용도의 대체 수자원으로 활용하는 정책이 추진되고 있다. 서울시의 경우에는 중량물재생센터의 2처리장 방류수를 고속응집침전공정으로 처리하여 중랑천 및 5개 지류천에 친수용수 및 하천유지용수로 공급하고 있다. 본 연구에서는 고속응집침전공정에 대한 응집제와 응집보조제의 비교분석 및 현장 실험을 실시하고 경제성과 약품 사용에 따른 운영관리 등을 검토한 후 고속응집침전 공정에 대한 개선방안을 제시하고자 하였다.

IV. 연구내용

1. 자테스트를 통한 고속응집침전 기존 공정 검토 및 응집제별 효율 실험
 - 기존 공정의 약품주입량 최적 조건 평가실험
 - 실험 응집제별 약품주입량에 따른 공정 효율 평가실험
2. 현장 약품 투입 실험을 통한 고속응집침전공정 운전인자 도출
 - 응집제 및 보조응집제의 효과평가
 - 총인, 부유물질 등의 처리수 수질 분석

V. 연구결과

하수처리장 방류수를 친수용수 및 하천유지용수 등의 재이용수로 처리하는 시설인 고속응집침전공정의 효율적인 운영방안을 마련하기 위해 응집제 및 보조응집제에 대한 자테스트(Jar-Test) 실험 및 현장 실험을 실시하고 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 고속응집침전 공정을 검토한 결과 Alum 70ppm 및 폴리머 0.4mg/L로 운영시 재이용수 수질기준을 만족할 수 있을 것으로 예상되며, 주어진 농도에서 NaOH의 주입지점 변경을 통한 처리효율은 큰 차이가 없었으므로 주입지점 변경 없이 운영하는 것이 타당할 것으로 판단된다.
2. 현장 실험 결과, 응집제별 평균 총인 처리효율은 PAC>Alum>PAHCS 순으로 PAC가 70.75%로 가장 높았으며, 처리수 총인 농도는 0.19~0.31 mg/L로 재이용수 기준 0.5 mg/L의 1/2 수준이었으며, 응집제별 SS 제거효율은 PAC>Alum>PAHCS 순으로 PAC가 89.28%로 가장 높았고, 처리수 SS 농도는 0.31~0.80 mg/L로 재이용수 기준 6 mg/L 이하의 1/10 수준이었다.

3. 안정적 수질을 얻기 위한 응집제 주입량, NaOH 사용량, 반송에 따른 전력량 등의 경제성 평가 결과 PAC>Alum>PAHCS 로 PAC가 가장 경제적인 것으로 나타났다.
4. 약품에 따른 현장 운영 관리상의 특성을 살펴보면, Alum의 경우 NaOH를 상시 사용하여야 하고, PAC는 필요시 NaOH를 투입하므로 NaOH 관리에 따른 현장 운영자의 주의가 요구되며, 원수 변화에 따라 약품 주입량 조절이 필요한 반면, PAHCS는 NaOH를 첨가하지 않고 운영이 가능하였으며, 유입원수 변화에 따라 처리효율이 일정하게 유지되어 현장 운영 시 가장 유리한 특성을 보였다.

Ⅵ. 활용방안

본 연구에서는 하수처리수 재이용을 위한 처리시설인 고속응집침전공정의 응집제 및 보조응집제 주입에 대한 기초 자료로 활용할 수 있으며, 현장 실험에서 도출된 결과를 적용함으로써 경제성 및 안정적 운영에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.



목 차

1. 서론	319
2. 이론적 배경	321
2.1 재이용 일반 현황	321
2.1.1 하수재이용 관련 법률	321
2.1.2 국내 하수처리수 재이용 현황	321
2.1.3 국외 하수처리수 재이용 현황	324
2.1.4 하수처리수 재이용 용도별 수질기준	326
2.1.5 용도별 재처리공정	328
2.2 응결·응집 원리	329
2.2.1 응결(Coagulation)의 원리	329
2.2.2 응집(Flocculation)의 원리	331
2.3 물리·화학적 인 제거	332
3. 연구방법	336
3.1 실험개요	336
3.1.1 실험 대상	336
3.1.2 목표수질의 선정	337
3.1.3 분석내용 및 기간	338
3.1.4 자테스트(Jar-Test) 실험방법	338
3.2 분석항목 및 방법	339

4. 결과 및 고찰	340
4.1 유입원수 성상	340
4.1.1 유입원수 성상	340
4.1.2 유입원수 여과 전·후 수질 비교실험	340
4.2 자테스트에 의한 기존 공정 및 응집제별 효율 비교실험 결과	341
4.2.1 Alum 및 폴리머 주입량 변화에 따른 총인 제거효율	341
4.2.2 pH 변화에 따른 제거효율	343
4.2.3 응집제 투입 순서에 따른 총인 제거효율	345
4.2.4 응집제별 총인 제거효율	346
4.3 현장 약품주입 실험 결과	347
4.3.1 응집제별 총인 제거효율	347
4.3.2 응집제별 고형물(SS) 제거 효율	349
4.3.3 응집제별 투입에 따른 pH, 알칼리도 변화	350
4.3.4 원수 성상 변화에 따른 응집제 투입량 조절	351
4.4 경제성 평가	352
5. 결론	354
참고문헌	355

표 목 차

표 1. 국내 하수 재이용수 용도별 현황(하수도통계, 2012)	322
표 2. 하수 재이용수 용도별 특징(하수도통계, 2012)	323
표 3. 목표 연도별 하수처리수 재이용 계획(환경부, 2013)	324
표 4. 해외 하수처리수 재이용 현황	326
표 5. 해외 용도별 재이용 현황	326
표 6. 하폐수처리수 용도별 수질기준(환경부, 2013)	327
표 7. 수질항목별 재처리설비(환경부, 2013)	328
표 8. 용도별 재처리공정 분류 사례(환경부, 2007)	329
표 9. 응집제 종류별 인 제거원리	332
표 10. 응집제의 종류 및 특징	335
표 11. 중량천 하천유지용수 사용현황	337
표 12. 하천유지용수, 친수용수로의 하수재이용수 수질기준(환경부, 2013)	337
표 13. 실험 내용 및 기간	338
표 14. 실험 응집제 특성	339
표 15. 분석항목 및 분석장비	339
표 16. 여과 전·후 유입수 성상 비교(2014. 5)	341
표 17. Alum 및 폴리머 주입량에 따른 자테스트 결과	342
표 18. 응집제 주입 순서에 따른 pH, 총인 농도 변화	346
표 19. 총인 농도에 따른 응집제별 처리효율	348
표 20. SS 농도 및 응집제별 처리효율	350
표 21. 응집제별 알칼리도 변화	350
표 22. 응집제 주입률 변화에 따른 총인 제거율(%) 변화	351
표 23. 응집제 주입률 변화에 따른 SS 제거율(%) 변화	352
표 24. 약품주입량에 따른 경제성 비교	353
표 25. 1지당 펌프 가동 금액	353

그림 목 차

그림 1. 국내 연도별 하수처리수 재이용 현황(하수도통계, 2012)	322
그림 2. 입자 표면의 제타 전위	330
그림 3. 고속응집침전 공정 처리계통도	336
그림 4. 2처리장 처리수 수질 변화(중량물재생센터 월보, 2014)	340
그림 5. Alum 및 폴리머 주입량에 따른 총인 변화	343
그림 6. NaOH 주입률에 따른 총인 변화	344
그림 7. NaOH 주입률에 따른 pH 변화	344
그림 8. NaOH 주입지점 및 주입량 변화에 따른 pH, 총인 농도 변화	345
그림 9. 응집제별 총인 농도 변화	346
그림 10. 응집제별 pH 변화	347
그림 11. 현장 실험 결과(총인 농도 변화)	348
그림 12. 현장 실험 결과(SS 농도 변화)	349
그림 13. 유입수 및 응집제 주입후 pH 변화	351
그림 14. 현장 실험 기간 중 약품주입량 변화	352

최근 지구온난화 및 기후변화에 따른 기상이변 현상의 증가와 강우패턴의 변화, 기온 상승 등의 환경요인으로 물 순환체계에 영향을 미치고 있다. 또한 지속적인 인구증가와 경제 성장에 따른 산업화·도시화 촉진에 따른 오염물질의 확산으로 지표수 및 지하수의 오염으로 용수 공급과 물 순환 체계에 심각한 위기를 맞을 것으로 예상된다.

이에 한정된 수자원의 효율적 이용방안을 마련하기 위해 국내에서는 자연형 수원의 보호, 향후 심화 될 가능성 있는 물 부족 문제에 대한 대응과 물 순환 건전성을 확보하기 위해서 대체 수자원을 활용하는 정책을 추진하고 있으며, 이러한 정책의 일환으로 2010년 6월에 하수처리수 재이용, 빗물 이용, 중수도를 통합한 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」을 제정한 바 있다.

또한, 최근 생활수준이 향상되고 생태하천 및 친수공간에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데 도시화에 의한 불투수지역의 확대는 지하수 함량 감소로 인하여 지하수위 및 하천수위가 저하되고, 하수보급률의 증가로 인한 하천유량이 감소하여 도시하천은 수량부족 및 수질악화 등의 문제와 생물 서식환경 악화, 환경기능을 상실하게 되었다.

이에 하천생태계 복원 및 친수공간 조성을 위한 하천유지유량 확보방안 등을 위해 하천, 댐 등의 기존 취수원과 다른 대체수자원을 개발하고, 막대한 양이 방류되는 양질의 하수처리수를 다양한 용도로 재이용하는 것에 대해 관심이 집중되고 있으며, 도시하천의 물순환 개선을 위해 하수처리장에서는 하수처리수의 재이용을 확대하기 위한 방안을 다각도로 모색 중이다. 특히 서울시의 경우 도시하천이 건천화된 하천이 많은 지역으로 나타나 하천 유지용수로의 활용이 큰 상황이다(지용근 등).

따라서 본 연구에서는 현재 중량물재생센터에서 하천유지용수 및 친수용수 목적으로 중량천 및 5개 지류천으로 공급하고 있는 중량천 용수공급시설에서 설치 운영 중인 고속응집침전 공정의 응집제 및 응집보조제 투입현황 분석 및 현장 실험을 통해 경제성과 약품사용에 따른 운영관리 방법 등을 검토한 후 고속응집침전 공정에 대한 개선방안을 제시하고자 하였다.

2.1 재이용 일반 현황

2.1.1 하수재이용 관련 법률

장래 물부족 문제가 심화될 가능성에 대한 대응을 위해서 대체 수자원을 활용하여 친환경 수자원 확보 노력의 일환으로 법규 제정, 시범사업 시행, 가이드 북 출간, 기본계획 수립하여 시행하고 있다. 그 중 하수재이용 관련 사항은 2007년 9월 개정된 하수도법에서 하수처리장 방류수의 재이용을 의무화하였고, 2011년 6월에는 빗물과 하수처리수 등 물 순환이용을 촉진하고 신규 물산업으로 육성코자 환경부에서 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」을 제정하였다.

「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」 제10조에 따르면 「하수도법」 제18조에 따른 공공하수도관리청(관할 지방자치단체의 장)은 하·폐수 재처리수를 재이용하거나 필요로 하는 자에게 공급해야 한다고 되어 있다.

또한, 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률 시행령」 제12조에 의해 하수 재처리수를 재이용 또는 공급해야할 대상 시설은 1일 하수처리용량 5천³ 이상인 하수처리장이며, 재처리수를 이용 또는 공급해야할 하수처리수량은 1일 처리량의 10%로 정하였다.

2.1.2 국내 하수처리수 재이용 현황

2012년 말 기준(환경부)으로 전국에 가동 중인 하수처리시설의 하수처리량은 연간 66억 톤이며, 하수처리수 재이용량은 14.4%인 7.1억 톤으로 나타났다. 그림 1에서와 같이 재이용량은 2008년 이후 매년 조금씩 증가하는 추세이었다. 표 1의 재이용수 용도별 현황을 살펴보면, 재이용수의 절반

이상(5.3억톤, 52.9%)이 세척수, 청소수, 냉각수 등 장내용수이며, 나머지(4.7억톤, 47.1%)는 하천유지용수, 공업용수, 농업용수 등의 장외용수로 재이용하고 있었다. 특히 국내 하수 처리장의 재이용수의 경우에는 장외용수보다 장내용수의 재이용 비율이 높고, 장외용수 중 하천유지용수가 약 60%로 편중되어 있어, 향후 하수처리수 재이용 확대를 위해서는 재이용수를 다양한 용도로 활용하는 방안이 필요할 것이다.

표 2와 같이 하천유지용수외에 공업용수, 농업용수, 도시생활용수 등으로 활용하고 있으나 수요처 확보 및 이송시설 건설 등의 경제적 이유로 재이용수 확대에 어려움이 있으며, 공급자가 요금을 받을 수 있는 용도는 도시재이용수, 공업용수 등으로 한정되므로 대규모 용수를 사용하는 공업용수를 대상으로 하는 것이 바람직할 것이다.(김용성 등)

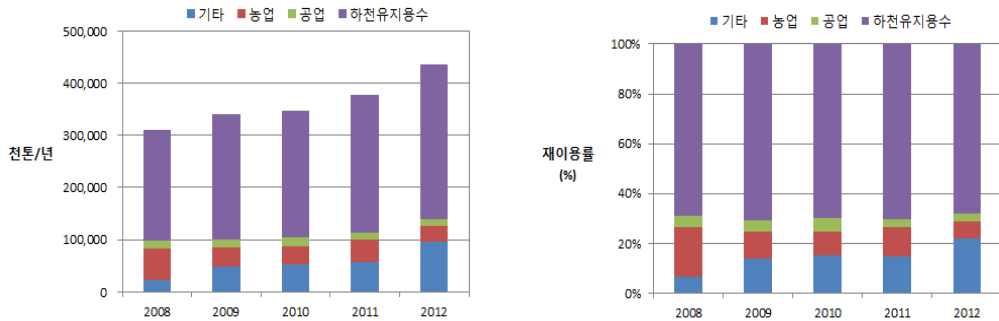


그림 1. 국내 연도별 하수처리수 재이용 현황(하수도통계, 2012)

표 1. 국내 하수 재이용수 용도별 현황(하수도통계, 2012)

구 분	계	하수처리장 장내용수							하수처리장 장외용수				
		소계	세척수	냉각수	청소수	희석수	조경수	기타	소계	하천유지용수	농업용수	공업용수	기타
재이용량 (천m ³ /일)	1,003,663	530,602	193,273	57,632	44,947	23,385	598	210,767	473,061	282,151	79,996	13,717	97,197
비율(%)	100	52.9	19.3	5.7	4.5	2.3	0.1	21	47.1	28.1	8	1.4	9.6

※ 기타 : 소각장 냉각용수, 생태연못 유지용수, 골프장 잔디용수 등

표 2. 하수 재이용수 용도별 특징(하수도통계, 2012)

용도	특징
공업용수	- 주로 공단지역에서 최근 증가 추세이며 총 11개소 운영 ▶ 포항하수처리장 : 100,000m ³ /일 포스코 단지내 공급 ▶ 인천 가좌하수처리장 : 16,000m ³ /일 현대제철에 공급
농업용수	- 총 57개 하수처리장에서 생산·공급 ▶ 충남 11개, 전남10개, 충북 9개, 경기 7개, 경남 7개, 경북 6개 ▶ 천안하수처리장 : 20,000m ³ /일 생산하여 공급
도시생활용수 등	- 74개 하수처리장에서 생산·공급하나 적은 편임(0.33%) ▶ 인천 송도하수처리장 : 13,000 m ³ /일 생산하여 공급

환경부 「물 재이용 기본계획」에 따르면 2020년 하수처리수 총 재이용(장외용수)목표량은 연간 1.6억m³(4.3백만m³/일)으로 2008년도 대비 5.7배 높게 책정되어있다. 그 중 하천유지용수가 전체 재이용량의 49%(2.1백만m³/일)로 가장 많고, 공업용수 32%, 도시생활용수 12%, 농업용수 7% 순이었다.

하수 재이용수의 경우에는 신규 수요처 확보가 어렵고, 재이용 시설 및 배관설치 투자비, 유지관리비 등에 대한 부담으로 상대적으로 하천유지용수로의 사용이 많은 실정이다.

하천유지용수, 농업용수 등의 재이용수 사업의 경우에는 오염 저감 및 지역주민 생활환경 개선 목적으로 공공부문 국고지원 사업으로 추진하고 있으며, 공업용수 등 수익성이 있는 재이용 사업은 민간투자사업으로 추진하고 있다. 하수처리수 재이용 국고지원 사업을 통해 2006년부터 2010년까지 총 38개소가 도입(2006년 6개소, 2007년 6개소, 2008년 5개소, 2009년 12개소, 2010년 9개소)되었으며, 2009년 총 사업비 1조 4천억원으로 23개 민간투자 사업을 추진하여 2016년까지 공업용수를 연간 4.4억m³(1.2백만m³/일) 공급 목표로 삼고 있다. 이는 전체 공업용수 수요량의 17%를 차지한다.

표 3. 목표 연도별 하수처리수 재이용 계획(환경부, 2013)

(단위 : 천^m³/년)

목표 연도	2008년	1단계 (2012년)	2단계 (2016년)	3단계 (2020년)
공업용수	15,044	104,834	353,034	507,090
농업용수	26,840	50,052	84,811	106,388
하천유지용수	213,537	279,248	527,094	777,940
도시생활용수 등	21,056	70,294	125,294	185,294
합 계(장외)	276,477	504,428	1,090,233	1,576,712
전체 재이용률 (장외 재이용률)	10.80%	14.20%	23.40%	31.10%

1. 장내 재이용량은 2008년 기준으로 향후 변동 없음(401,541 천^m³/년)
2. 총하수처리량은 2008년 기준(6,363,045 천^m³/년)

2.1.3 국외 하수처리수 재이용 현황

국외의 하수처리수 재이용 현황은 표 4에서 볼 수 있듯이 미국, 싱가포르, 호주, 일본 등은 1.4~52% 재이용하고 있으며, 국가별로 다소 차이가 있다. 표 5의 용도별 재이용 현황은 기존 수자원을 대체하여 생활용수, 농업용수 등으로 재이용하거나, 하천유지용수 또는 친수용수 등 공공성격을 띤 용도로 재이용 하는 것이 일반적이다. 또한 절대적인 물 부족 또는 인근 국가와의 마찰 소지 때문에 물 안보차원에서 재이용하는 경우도 있다. 그 예로 싱가포르는 상수원수의 75%를 말레이시아에서 수입하고 있어, 안정적 물공급을 위해 재이용사업(NEWater Project)을 추진하여 공업용수 및 간접음용수로 이용하고 있다. 주로 장내용수로 재이용하는 국내 실정과는 다르게 조경용수, 공업용수 등의 비율이 높은 것이 특징이다.

특히, 물부족 지역이나 국가들에서 하수처리수 재이용률이 높게 나타나며, 사우디아라비아의 경우 하수재이용률은 2012년 16%에서 2016년 65%로, 호주는 2008년 8%에서 2015년 30%로 확대할 계획이며, 이스라엘은 일반 생활하수를 70%까지 재사용하여 재이용률이 가장 높았다.

미국(캘리포니아, 플로리다), 유럽 및 이스라엘 국가들의 경우 지하수 충진을 통한 간접음용수원 확보, 지하수위 저하 및 해수 침투 방지 등의 다양한 방법으로 하수 재이용수를 이용하고 있다.

일본의 경우에는 1979년 후쿠오카에서 처음으로 하수처리수 재이용 시범 사업이 실시되었으며, 동경도는 1984년부터 도심지역, 대형빌딩 등에 화장실 용수로 하수 재이용수를 공급하고 있다. 2011년 일본의 하수 재이용수는 연간 187억 m^3 (521천 m^3 /일)로 하수 재이용수 용도로는 하천유지용수와 조경용수 각 28%로 가장 많고 용설용수 21%, 공업용수 9%, 농업용수 8% 순으로 나타났다.

미국의 경우에는 1926년 아리조나주 그랜드캐니언 국립공원에서 발생하는 오수를 처리하여 화장실 세척용수, 잔디밭 조경용수, 냉각용수 등으로 최초 (114 m^3 /일)로 하수 재이용수를 사용하였으며, 플로리다주의 하수 재이용률은 52%로 미국에서 가장 높으며, 434개 하수처리장에서 처리량의 49%(2.7백만 m^3 /일)를 하수 재이용수로 생산하여 조경용수로 54%, 공업용수 17%, 지하수 충전수 14% 등으로 사용하고 있다. 캘리포니아주는 234개 하수처리장에서 2.2백만 m^3 /일을 재이용수로 생산하고 있으며 농업용수 29%, 조경용수 19% 등으로 사용하고 있다.(Daniel Newton)

싱가포르는 강, 호수, 하천이 많지 않고 빗물 집수공간 등이 작아 수자원량은 전체 물 수요의 20%에 불과하여 다른 국가에서 수자원을 수입하고 있어, 만성적인 수자원 부족량을 해결하기 위해 하수 재이용수 처리시스템 도입 하였다. 하수처리수를 식수 등 생활용수로 사용할 수 있는 수준까지 고도처리 하며, 228천 m^3 /일의 물을 생산하여 싱가포르 전체 물 수요의 30%을 담당하고 있으며, 2060년까지 물수요의 50%를 하수 재이용수로 이용하는 목표를 세워 추진하고 있다(조일형 등).

표 4. 국외 하수처리수 재이용 현황

국가명	일본	미국 Florida	미국 California	싱가포르	호주	이스 라엘	쿠웨 이트
재이용률	1.4% (54만톤/일)	52% (220만톤/일)	10% (170만톤/일)	6.7% (9.1만톤/일)	12%	10%	15%

표 5. 국외 용도별 재이용 현황

구 분	사용량 (천m ³ /일)	재이용률 (%)	사 용 처
일 본 (2011)	512.3	1.3	하천유지용수 28%, 조경용수 28%, 공업용수 9%, 농업용수 8%, 용설용수 21% 등으로 사용
미국(플로리다) (2013)	2,721.5	49.0	조경용수 54%, 농업용수 10%, 지하수 충전수 14%, 공업용수 17% 등
미국(캘리포니아) (2009)	2,260.8	13.4	농업용수 29%, 조경용수 19%, 지하수 충전수 13%, 공업용수 7%, 습지용수 등 23%
싱가포르 (2010)	227.9	30.0	생활용수 10%, 공업용수 70%, 상업지역 냉각용수 20%

2.1.4 하수처리수 재이용 용도별 수질기준

재이용수 수질에 대한 기준은 환경부 권고기준이 마련된 상태이며, 기본적으로 하수처리시설의 방류수 수질기준을 만족하여야 하고, 방류수 수질 기준보다 강화 또는 추가되는 항목에 대해서는 환경부에서 제시한 표 6의 <하수처리수 재이용 용도별 수질기준>을 적용한다고 되어 있다.

표 6. 하폐수처리수 용도별 수질기준(환경부, 2013)

구분	도시 재이용수	조경 용수	친수 용수	하천 유지 용수	농업용수		습지 용수	지하수 충전	공업 용수
					직접식용	불검출			
총대장균군수 (개/100mL)	불검출	≤200	불검출	≤1000	직접식용	불검출	≤200	「먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙」 별표1에 따른 먹는물의 수질 기준을 준수할 것	≤200
결합잔류염소 (mg/L)	≥0.2	-	≥0.1	-	간접식용	≤200			-
탁도(NTU)	≤2	≤2	≤2	-	직접식용	≤2	-		≤10
					간접식용	≤5			
SS(mg/L)	-	-	-	≤6	-		≤6		-
BOD(mg/L)	≤5	≤5	≤3	≤5	≤8		≤5		≤6
냄새	불쾌하지 않을 것	불쾌하지 않을 것	불쾌하지 않을 것	불쾌하지 않을 것	불쾌하지 않을 것		불쾌하지 않을 것		불쾌하지 않을 것
색도(도)	≤20	-	≤10	≤20	-		-		-
T-N(mg/L)	-	-	≤10	≤10	-		≤10		-
T-P(mg/L)	-	-	≤0.5	≤0.5	-		≤0.5		-
pH	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5		5.8~8.5	5.8~8.5	
염화물 (mgCl/L)	-	≤250	-	-	-		≤250	-	
전기전도도 (μs/cm)					직접식용	≤700			
					간접식용	≤2000			

※ 농업용수 수질기준 추가 권장항목(mg/L)

Al	As	B-total	Cd	Cr ⁶⁺	Co	Cu	Pb
5이하	0.05이하	0.75이하	0.01이하	0.05이하	0.05이하	0.2이하	0.1이하
Li	Mn	Hg	Ni	Se	Zn	CN	PCB
2.5이하	0.2이하	0.001이하	0.2이하	0.02이하	2이하	불검출	불검출

- 1) 농업용수 수질기준 중 직접식용은 조리하지 않고 날것으로 먹는 경우, 간접식용은 조리를 하거나 일정한 가공을 거쳐 먹는 경우에 적용한다.
- 2) 공업용수 수질기준은 산업용수로 사용하는 경우에 적용하며, 다회순환냉각수, 공정수, 보일러용수 등은 수요처와 협의하여 수질을 정할 수 있다.
- 3) 하·폐수처리수 재처리수 수질기준은 하수처리수 재처리시설에서 최종 처리하여 송수하는 수질에 대하여 적용하며, 공공하수처리시설의 방류수수질기준이 재처리수의 기준보다 강할 경우에는 「하수도법 시행규칙」을 따른다.
- 4) 공공하수도관리청이 공익적 목적으로 공급하는 도시 재이용수, 하천유지용수, 조경용수, 친수용수, 농업용수에 대한 수질기준은 2013년 6월 9일부터 적용한다.

2.1.5 용도별 재처리공정

하수처리수를 재이용하기 위해서는 2차 처리수 수질과 동등하거나 그 이상의 수질이 요구된다. 생물학적 2차 처리수에는 부유물질, 유기물, 용해성 무기물 등의 오염물질이 존재하며, 이는 주로 여과와 소독공정을 추가함으로써 제거할 수 있다. 따라서 재이용 목적 및 용도에 맞는 재처리공정의 선택이 중요하며, 수질항목별 재처리설비는 표 7과 같고, 재이용수 용도별 재처리공정 분류 사례는 표 8에 나타내었다. 처리공정 선정 시, 오염물질을 단독 공정으로 처리하기 어려운 경우, 재이용 용도에 맞춰 처리공정을 결합하여 공정을 변화할 수 있으며, 재처리공정의 구체적인 설치 기준은 ‘물 재이용시설 설계 및 유지관리 가이드라인(환경부)’에 준하도록 하고 있다.

표 7. 수질항목별 재처리설비(환경부, 2013)

대분류	중분류	소분류	유기물등의 생물처리법 ~질산화법	부유물질등의 물리화학적 처리법				용해성물질등의 물리화학적 처리법			소독법		
			생물막 여과법	급속사 여과법	응집침 전법	응집 여과법	한외 여과법	활성탄 흡착법	역삼 투법	오존 산화법	염소 소독	오존 소독	자외선 소독
기본적 수질 항목	위생 항목	대장균 균수	○		△	△	◎	△	◎	◎	◎	◎	◎
	환경 항목	BOD	○	△	△	△	○	○	◎				
		pH			□	□							
	미관유 지항목	탁도	○	○	◎	◎	◎	○	◎				
		취기 색도	△				△	○	◎	○		△	
용도별 수질 항목	미관유 지항목	발포 원인 물질	△					◎	○	△		△	
		무기성 탄소	△						◎				
	어류생 식항목	용존 산소								○			
		암모니 아질소	○							○			
		잔류 염소	-	-	-	-	-	-	-	-		(◎)	(◎)

[범례] ◎(처리대상) : 개략제거율 90% 이상,
 ○(처리대상) : 개략제거율 50% 이상(제거율은 용존산소를 제외)
 △(유 효) : 개략제거율 20~50% 이상
 □ : pH 조정

표 8. 용도별 재처리공정 분류 사례(환경부, 2007)

재이용 용도		처리 방법(예시)
범용 재이용수	청소용수	· 모래여과
	도시조경용수	· 모래여과
	친수용수	· 모래여과 + 활성탄
	하천유지용수	· 모래여과 · MF(Micro Filtration)
	관개용수	· 모래여과 · MF
인체접촉 및 직접영향 재이용수	인체접촉 세척용수	· MF+R/O · 생물반응조내 침지막 설치+R/O
	직접 관개용수	· MF+R/O 이상
고도 환경용수	습지용수	· 모래여과+활성탄 · MF+R/O · 생물반응조내 침지막 설치+R/O
	지하수 충전	· 모래여과+활성탄 · MF+R/O · 생물반응조내 침지막 설치+R/O
	음용수자원 보충	· MF+R/O · 생물반응조내 침지막 설치+R/O
공업용수		· 6가지 조합 모두 가능

2.2 응결·응집 원리

2.2.1 응결(Coagulation)의 원리

응결이란 수중에 응집제를 주입하여 급속 혼합시켰을 때 콜로이드 상태의 부유물질과 미세한 부유물질이 불안정화 상태가 되고 불안정화 된 입자들끼리 서로 부착하게 되는 현상이다.

용수처리에 있어서 화학적인 응결은 보통 $Al_2(SO_4)_3$ 또는 $FeCl_3$ 와 같은 3가의 금속염을 주입하여 일어나게 된다.

① 전기적 응집론 - DLVO(Derjaguin and Landau, Verwey and Overbeek) 이론
음전하를 띤 콜로이드 입자 간에 작용하는 주요한 힘으로는 전기적인 반발력과 반데르발스 인력이 있는데, 이 두 힘의 합력은 짧은 거리에서 최대 반발력을 보이는 에너지 장벽이 존재하며, 열운동으로 두 입자가 이러한

에너지 장벽을 이기고 더 가까워지면 인력이 크게 작용되어 응결이 일어나게 된다.

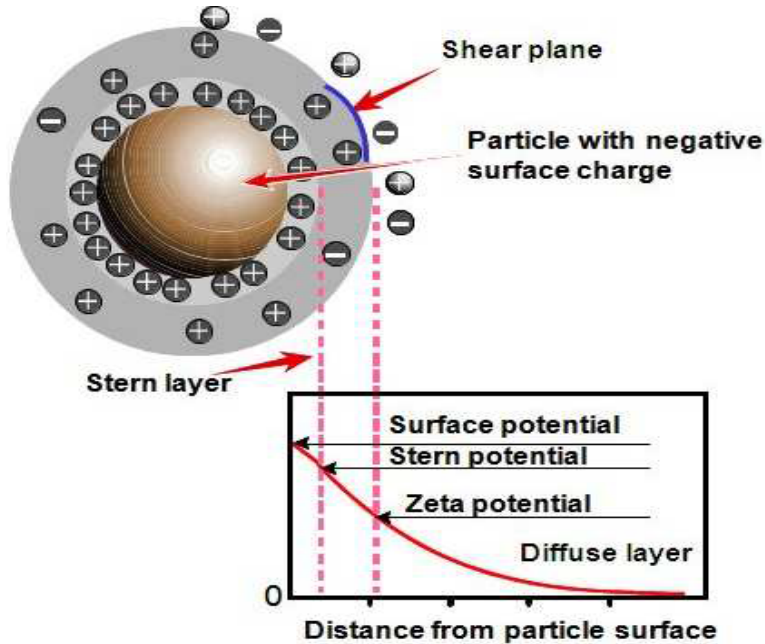


그림 2. 입자 표면의 제타 전위

② 화학적 응결론 - 가교 현상(Bridging)

고분자 응집제(고분자 전해질, Polyelectrolyte)에서 보이는 현상으로 제타 전위가 미치지 못할 만큼 멀리 떨어져 있는 입자 사이에서 긴 고분자 응집제는 전하를 띤 부위가 많으며 이 부위는 각각 다른 전하를 띤 입자부위와 결합하여 입자와 입자를 묶는 다리(Bridge)역할을 하여 많은 입자를 한 데 뭉치게 한다.

③ 과량응결(Sweep coagulation)

이미 생성된 과량의 수화물(예, $Al(OH)_3$)이 콜로이드 물질을 에워싸듯이 결합하여 응결되는 체거름(Enmeshment) 현상에 의하여 콜로이드를 제거하는 응결방식이다.

2.2.2 응집(Flocculation)의 원리

급속교반에 의해 응집제를 골고루 섞어 입자를 불안정화(화학적 프로세스)한 후 플럭형성지에서는 불안정화 된 입자를 완속으로 교반하여 입자끼리의 접촉기회를 크게 하는 충돌을 유발(물리학적 프로세스)하여 플럭이 커지게 하는 역할을 한다.

후속되는 공정의 종류에 따라 플럭형성지에서 생산해야 하는 플럭의 크기와 형상이 달라진다. 즉, 후속공정이 침전공정일 경우에는 침전지에서 침전이 잘되도록 침강성이 좋은 플럭을 생성해야 하는 반면, 후속공정이 여과공정일 경우에는 여과가 잘되도록 하기 위하여 플럭의 크기는 작지만 밀도가 높은 플럭을 생성하여야 한다. 또한 일단 생성된 플럭을 깨지지 않도록 하기 위해 교반방법이나 수리학적 설계 시 세심한 주의를 필요로 한다.

응집과정에서 고려되어야 하는 주요한 물리적 현상은 다음과 같다.

① 브라운 운동(Brownian Motion)

주위에 있는 물 분자의 열역학적 불안정에 의해 콜로이드 입자가 계속해서 움직이는 운동을 말하며 온도와 밀접한 관계가 있다.

② 유체전단(Fluid Shear)

외부로부터 에너지를 가하여 유체에 속도경사(G)가 생기도록 하여 그로 인해 입자끼리 충돌하도록 하기 위한 것으로 대부분의 플럭 형성 공정에서는 이 G값을 설계나 운전인자로 사용하고 있다.

③ 속도차 침전(Differential Sedimentation)

침전속도가 서로 다른 두 입자가 침전할 때 입자간 침강속도의 차이에 의해 충돌하는 것을 말한다. 각 이송 메커니즘에 대하여 충돌에 이르는 효율을 구하기 위해서는 입자가 움직일 때 발생하는 수리동력학적인 힘과 반데르발스 힘, 정전기적 반발력 등을 고려해야 한다.

2.3 물리·화학적 인 제거

물리·화학적 인 제거 원리는 수중 인을 응집제와 반응시켜 불용성 입자화한 후 침전이나 여과로 고액분리를 하는 방법으로 수중에서 전하를 띠는 침전성이 불량한 콜로이드성 물질에 응집제를 첨가하여 전기적 중화로 입자간 반발력을 감소시키고 입자들을 충돌시켜 크게 뭉치게 하는 응집 과정을 거쳐 입자의 덩어리인 플럭을 형성하여 제거하는 방법으로 응집제로는 알루미늄염과 철염을 주로 사용한다.

표 9. 응집제 종류별 인 제거원리

응집제 종류	제 거 원 리
알루미늄염	$\text{PO}_4^{3-} + \text{Al}^{3+} \rightarrow \text{AlPO}_4 \downarrow$ $\text{Al}^{3+} + (3-x)\text{H}_2\text{O} + x\text{PO}_4^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 \cdot x(\text{H}_2\text{PO}_4)_x + (3-x)\text{H}^+$ $\text{Al}(\text{OH})_3 + x\text{H}_2\text{PO}_4^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 \cdot x(\text{H}_2\text{PO}_4)_x + x\text{OH}^-$
철염	$3\text{Fe}^{3+} + 2\text{PO}_4^{3-} \rightarrow (\text{FeOH})_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{H}^+$ $3\text{Fe}^{2+} + 2\text{HPO}_4^{2-} \rightarrow \text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 + 2\text{H}^+$

pH, 교반강도, 알칼리도, 수온 등의 응집조건에 따라 응집효과 차이가 발생한다. 일반적으로 응집제마다 최적 pH 조건이 있으며, 수중 인의 형태에 따라 제거가 용이한 pH 범위가 존재하며, 최적 pH 이외의 조건에서는 오히려 응집효과가 감소한다.

유체의 교반을 통한 난류변동을 통해 응집제와 인의 접촉기회를 증가시키고, 형성된 입자간 충돌을 증가시켜 침전성이 양호한 플럭의 형성이 가능하나, 과도한 교반은 응집된 플럭을 붕괴시켜 오히려 침전성이 감소하므로 적정 교반강도를 유지할 필요가 있다.

교반강도는 속도경사(G)로 계산되는데, 응집시간(교반조의 체류시간) t(sec)와 함께 G.t값이 사용된다.(양호한 응집의 G.t는 $10^4 \sim 10^5$)

$$G = \sqrt{\frac{C A \nu^3}{2 \nu V}}$$

G = 속도경사(sec⁻¹)

C = 교반기 저항계수(1.5)

A = 교반기 날개 면적 (m²)

ν = 교반기 선속도 (m/s)

ν = 물 동점성계수 (m²/s)

V = 교반조 부피 (m³)

무기응집제는 수중에서 알칼리도와 작용하여 수산화침전물을 생성하며 응집효과를 나타내기 때문에 현탁액 중에는 응집제 투여량에 따른 적당한 알칼리도가 존재하여야 한다. 응집제의 투여량이 많을 경우에는 부족한 알칼리도를 보충하기 위하여 알칼리제 투여가 필요하다.

수온은 응집반응, 입자의 성장, 침강 분리에 영향을 미치는 중요한 인자로, 수온이 높아지면 화학적 활성이 증가하고 플록 성장을 촉진시키나, 수온이 낮아지면 응집제의 반응성이 낮아져 응집보조제가 필요하다.

응집제로는 황산알루미늄, 폴리염화알루미늄 등의 알루미늄염, 황산제1철, 염화제2철 등의 철염이 주로 사용되고, 흔히 Alum이라 불리는 황산알루미늄(Al₂(SO₄)₃·xH₂O)은 수산화알루미늄과 황산으로부터 제조되며, 편의상 주로 액상 황산알루미늄이 사용된다. 폴리염화알루미늄(PAC, Poly Aluminium chloride)은 중합정도에 따라 염기도가 상이하고, 제조공정에 따라 특성이 다양하며, 응집효과가 우수하여 정수 및 하수처리에 널리 사용된다.

황산제1철(Ferrous Sulfate, FeSO₄)은 인이나 악취 제거에 주로 사용되며 액상 혹은 고상으로 존재하는데, 황산제1철은 용액이 묽어 수송에 불리하고 취급이 까다로운 단점이 있다.

염화제2철(Ferric chloride, FeCl₃)은 철염 중 가장 범용되는 응집제로, 액상 혹은 고상으로 공급되며 비용이 경제적이나, 처리수의 색도 유발 가능성이 있다.

폴리황산규산알루미늄(PASS, Poly Aluminium Silicate)은 Si를 함유하면서 분자량이 100,000~300,000이며, Si를 포함하고 있으므로 침전성과 미세탁질의 제거효과가 우수하여 동절기에 응집성능이 좋다.

폴리염화알루미늄규산(PACS, Poly Aluminium Chloride Silicate)은 기존의 PAC(Al_2O_3 농도 10%) 응집제를 보다 고농도화 시킨 것으로 PAC에 Silicate를 첨가하여 응집성능을 개선한 것이다.

알루미늄-철(Al-Fe) 혼합 응집제는 응집 pH영역이 넓어 pH가 높은 폐수에 적합하고, Al 응집제의 응집력과 Fe 응집제의 침전성의 시너지 효과가 가능하나 안정성 문제로 적용사례가 드물다.

알루미늄-철-실리케이트(Al-Fe-Si)는 Si첨가로 응집효과를 상승시킨 응집제로서 Si의 첨가는 1% 이하로 하여야 하며, 그 이상 첨가하면 안정성이 감소한다.

원수의 탁도 증가나 저수온 또는 처리수량이 증가할 경우에는 응집제나 pH 조정제의 병용만으로 응집효과가 저조한 경우에는 응집보조제 사용이 필요하며, 일반적으로 황산알루미늄(Alum)을 사용할 때는 응집보조제가 필요하다. 활성 규산(activated silica)은 규산을 중합시켜 고분자콜로이드로 만든 것이며, 응집기능은 우수하지만, 여과시 손실수두가 빠르게 상승하여 조작의 어려움이 존재하며, 알긴산나트륨(sodium alginate)은 미역과 같은 해초로 만들어지는 천연 고분자제의 응집제로서 가교흡착과 이온교환 작용이 있으나, 분말상태로 공급되어 순도가 높으면 점성이 커서 용해가 어렵다.

표 10. 응집제의 종류 및 특징

제품 종류	Alum	PAC	PASS	PACS	Al-Fe	Al-Fe-Si	
화합물 종류	황산 알루미늄 (Aluminium Sulfate)	폴리 염화알루미늄 (Poly Aluminium Chloride)	폴리 황산규산 알루미늄 (Poly Aluminium Silicate)	폴리염화 알루미늄규산 (Poly Aluminium Chloride Silicate)	폴리염화 알루미늄철 (Poly Aluminium Iron Chloride)	폴리규산 알루미늄철 (Poly Aluminium Iron Silicate)	
성 상	Al ₂ O ₃ 8%	Al ₂ O ₃ 10%	Al ₂ O ₃ 8~10%	Al ₂ O ₃ 17%	Al ₂ O ₃ 5.5~9.5% Fe ₂ O ₃ 1~4.5%	Fe+Al = 7%	
염기도	0%	45~50%	25~50%	45~50%	45~50%	-	
약품 투입량	액상 20~60 μl/l	Alum 투입량의 70~80%	Alum 투입량의 50~55%	Alum 투입량의 30%, PAC 투입량의 60%	-	-	
제품 특성	일반 특성	음이온이 SO ₃ ²⁻ 인 단분자 응집제	음이온이 Cl이며 침전성이 우수	활성규산 첨가로 응집제를 고분자화 하였으나 음이온이 SO ₃ ²⁻ 임	무기고분자 응집제로 응집성을 극대화함. 음이온이 Cl임	유기물 제거효과 우수	유기물 제거효과 우수
	응집 효과	저온/고탁도 응집성이 나쁨	저온/고탁도시 우수	고농도 제품으로 저온/고탁도 시 우수		침강성 개선	침강성 개선
	응집 후 pH 변화	가장 많이 낮아짐	조금 낮아짐	조금 낮아짐		강하 낮음	강하 낮음
	잔류 Al 농도	높음	낮음	낮음		극소화	극소화

3 연구방법

3.1 실험개요

3.1.1 실험 대상

중량물재생센터 2처리장은 전체 시설용량 171만 m^3 /일 중 46만 m^3 /일을 A_2O 공법으로 가동 중에 있다. ‘중량천 용수공급 시설’은 2처리장 고도처리수를 중량천 및 지천으로 용수를 공급하는 시설로써 2처리장 고도처리수 20만톤을 공급받아 응집, 침전, 오존처리하여 하천유지용수 및 친수용수 목적으로 생산하고 있다.

이에 본 실험에서는 용수공급시설로 유입되는 2처리장 고도처리수를 실험 대상으로 하였다.

실험실 자테스트(Jar-Test)에 사용된 원수는 중량천 용수공급시설로 유입되고 있는 2처리장 고도처리수를 사용하였으며, 현장 실험의 경우 중량천 용수공급시설은 고속응집침전 공정의 5개지(각 4만톤)로 운영되고 있어, 그 중 2개지에 실험 약품을 주입하고 나머지 지와 비교 실험을 실시하였다(그림 3).

현장 실험에서는 용수공급시설 유입수에 실험 응집제 주입 후 급속교반, 플러형성조, 경사판 침전지를 통과한 월류수를 채수하여 실험하였다.

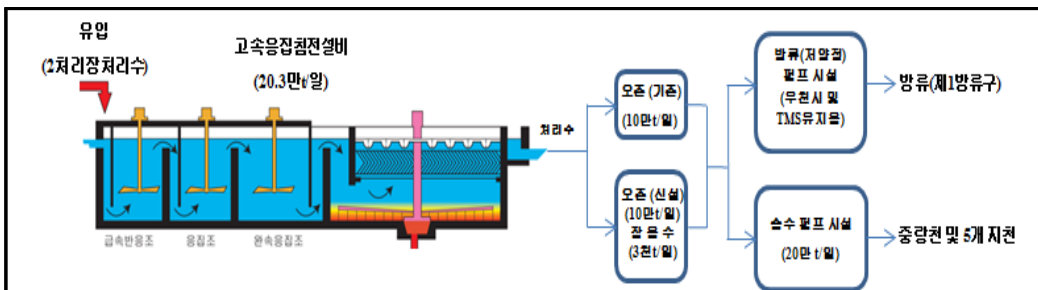


그림 3. 고속응집침전 공정 처리계통도

3.1.2 목표수질의 선정

중량천 용수공급시설에서는 하천유지용수 및 친수용수 등으로 활용하기 위해 중량천 및 지류천 5개소(우이천, 묵동천, 당현천, 방학천, 도봉천)로 하수 재이용수를 공급하고 있다. 본 연구에서는 고속응집침전공정 처리수의 수질이 친수용수 기준 만족 할 경우 도시재이용수, 조경용수, 천유지용수 기준을 만족할 수 있어, 재이용수를 다양한 방안으로 활용 가능할 것으로 판단된다. 환경부 하폐수처리수 용도별 수질기준 중 하천유지용수 및 친수용수 기준을 참조로 하여 목표수질을 선정하였다.

표 11. 중량천 하천유지용수 사용현황

구분	우이천	묵동천	당현천	방학천	도봉천	분류	계
유량 (m ³ /day)	30,000	10,000	36,000	20,000	20,000	84,000	200,000

표 12. 하천유지용수, 친수용수로의 하수재이용수 수질기준(환경부, 2013)

구분	하천유지용수	친수용수
총대장균군수(개/100mL)	30,000	불검출
결합잔류염소(mg/L)	-	0.1 이상
탁도(NTU)	-	2 이하
부유물질(SS)(mg/L)	6 이하	-
생물화학적 산소요구량(BOD)(mg/L)	5 이하	3 이하
냄새	불쾌하지 않을 것	불쾌하지 않을 것
색도(도)	20 이하	10 이하
총질소(T-N)(mg/L)	10 이하	10 이하
총인(T-P)(mg/L)	0.5 이하	0.5 이하
수소이온농도(pH)	5.8~8.5	5.8~8.5
염화물(mgCl/L)	-	-
전기전도도(μs/cm)	-	-

3.1.3 분석내용 및 기간

중랑천 용수공급시설의 고속응집침전 공정에 관한 연구를 진행하기 위해 자테스트와 현장 약품주입 실험을 실시하였다. 자테스트를 통하여 선정된 응집제 및 주입량을 바탕으로 운영중인 고속응집침전 공정 현장에 기존에 주입하던 응집제(Alum)와의 비교 실험을 실시하였다. 실험실 실험 및 현장 약품주입 실험 기간은 표 13와 같다.

표 13. 실험 내용 및 기간

실험 내용		실험 기간
자테스트	공정평가 실험	2014년 4월~7월
	응집제별 효율평가 실험	
현장 약품주입 실험(응집제 비교 평가 실험)		2014년 9월~12월

3.1.4 자테스트(Jar-Test) 실험방법

중랑천 용수공급 시설에 유입되는 유입수를 채취하여 시료를 1L 용량 비커에 각각 분취한 후 급속교반을 수행하면서 설정된 응집제 주입률에 따라 응집제를 주입하였다. 급속교반(150 rpm) 1분, 완속교반(60 rpm) 15분, 침전 30분 후 상정액을 채취하여 분석항목을 측정하였다.

자테스트에는 시판용 황산알루미늄(Aluminium Sulfate, Alum, 함량 8% as Al_2O_3)과 폴리염화알루미늄(Poly Aluminium Chloride, PAC, 함량 17% as Al_2O_3 , 염기도 35%), PAHCS(Poly Aluminum Hydroxy Chloro Sulfate, 함량 10% as Al_2O_3 , 염기도 70%)를 사용하였으며, 특성은 표 14와 같다.

표 14. 실험 응집제 특성

종 류	Al ₂ O ₃ (%)	비 중	염기도(%)
Alum	8%	1.32	-
PAC 2종 (Al ₂ (OH) ₃ Cl ₃)	17%	1.37	35
고염기도 PAC (Al ₂ (OH) ₃ Cl ₃)	12%	1.28	70
PAHCS (Al ₁₃ (OH) ₂₈ Cl ₉ SO ₄)	10%	1.23	70

3.2 분석항목 및 방법

수질항목은 수질오염공정시험기준에 따라 분석하였고, 분석항목에 따른 분석방법 및 장비는 표 15와 같으며 총인, 총질소는 Autoanalyzer(FIA)로 분석하였다.

표 15. 분석항목 및 분석장비

항 목	분석방법	분석장비	비고
BOD	수질오염공정시험기준	BOD배양기	
SS	수질오염공정시험기준	SS여과기	
T-N	수질오염공정시험기준 (자동분석법)	QC8500 series2 Autoanalyzer(FIA), LACHAT	
T-P	수질오염공정시험법 (자동분석법)	QC8500 series2 Autoanalyzer(FIA), LACHAT	
알칼리도	적정법	-	

4 결과 및 고찰

4.1 유입원수 성상

4.1.1 유입원수 성상

중량물재생센터 2처리장 고도처리수의 수질은 계절 및 운전 요인에 따라 변화를 보이고 있으며, 실험 기간 내 수질은 그림 4와 같다.

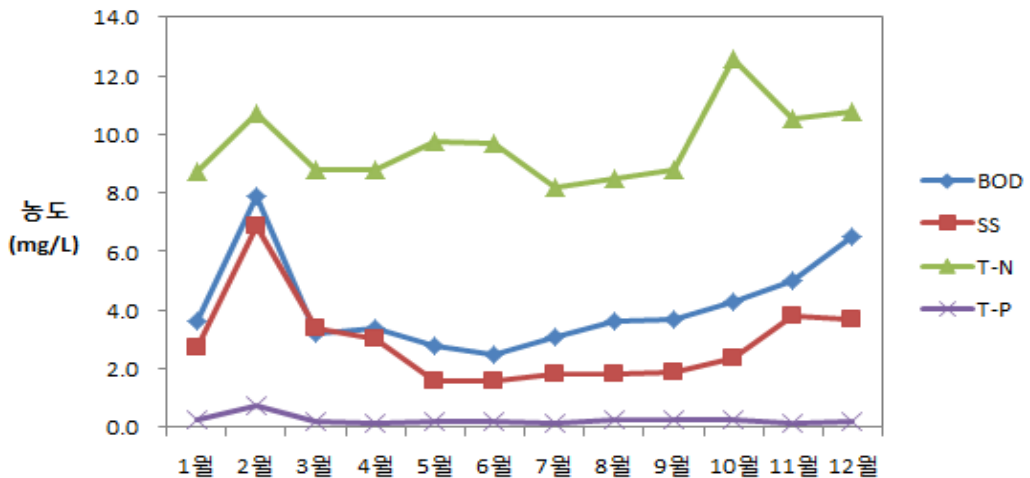


그림 4. 2처리장 처리수 수질 변화(중량물재생센터 월보, 2014)

4.1.2 유입원수 여과 전·후 수질 비교실험

용수공급시설로 유입되는 원수에 잔존하는 고형물이 수질에 미치는 영향을 파악하기 위해 GF/C($0.45\mu\text{m}$) 여과지로 여과하여 여과 전·후 수질을 비교하였다.

고도처리수의 오염물질 중 대부분은 유기성 물질이며, BOD의 50~80%,

COD의 20~40% 정도가 입자성 유기물에 의한 오염물질로 보고되고 있다 (환경부, 2005;김영철 등, 2003).

표 16과 같이 기존 연구내용과 같이 유입수는 대부분 생물학적으로 분해가 가능한 유기물로서 수중의 입자성 고형물 제거를 통해 BOD의 상당부분 (제거율 83.4%)이 제거되나 총인, 총질소의 경우에는 물속에 대부분 용존성 형태로 존재하여 총인 제거율은 0.8%, 총질소는 16.2%로 나타났다. 고형물 제거를 통한 총인, 총질소 농도 제어는 어려울 것으로 판단되며, 총인 제거를 위한 방법으로 응집제에 의한 화학적 인 제거가 요구된다. 따라서 고속응집 침전 공정의 효율 평가를 위해서 처리된 유입수의 SS 및 총인 제거율이 공정 효율의 중요한 인자로 선정하여 분석하였다.

표 16. 여과 전·후 유입수 성상 비교(2014. 5)

구분 \ 항목	BOD		T-N		T-P	
	농도 (mg/L)	비율 (%)	농도 (mg/L)	비율 (%)	농도 (mg/L)	비율 (%)
Total	3.15	100	7.4	100	2.64	100
Soluble (GF/C 여과)	0.52	16.5	6.2	83.8	2.62	99.2
Insoluble	2.63	83.5	1.2	16.2	0.02	0.8
하수 재이용수 친수용수기준	3이하		10이하		0.5이하	

4.2 자테스트에 의한 기존 공정 및 응집제별 효율 비교실험 결과

4.2.1 Alum 및 폴리머 주입량 변화에 따른 총인 제거효율

중랑천 용수공급시설의 고속응집침전 공정에서는 현재 응집제 Alum 8%, 응집보조제 음이온계 고분자폴리머를 사용하여 응집침전 후 오존처리하여 공급하고 있다.

운영조건은 Alum 70ppm, 폴리머 0.6 mg/L로 설계되어 있으며, 적정 사용량

여부를 판단하기 위하여 주입량에 따른 응집효율을 분석하였다.

총인 농도의 경우에는 Alum 주입률 70ppm이상에서 친수용수를 위한 하수 재이용수 기준 0.5 mg/L이하이었다. 응집제 주입률에 따라 폴리머 주입률을 0.4-0.6 mg/L 까지 비교한 결과, 폴리머 주입양보다 Alum 주입률에 따라 총인 제거율이 다르게 나타났다.

Alum 주입률 증가에 따라 pH 하강 폭도 커졌으며, 이는 주입된 Alum의 Al^{3+} 이온이 수중의 OH⁻ 이온과 반응하여 Alum 주입량이 증가함에 따라 pH 값이 내려가는 것으로 판단되었다.

총질소 농도는 고형물 제거실험과 동일하게 응집제 주입 후에도 농도가 크게 변하지 않았으며, 일부 질소성분이 제거되는 것은 SS 제거에 기인하는 것으로 보인다.

표 17. Alum 및 폴리머 주입량에 따른 자테스트 결과

① pH 변화

Alum (ppm)		0	50	60	70	80	90
Polymer (mg/L)	0	6.50	6.25	6.25	6.22	6.14	6.09
	0.6		6.19	6.17	6.16	6.14	6.09
	0.5		6.36	6.26	6.29	6.21	6.16
	0.4		6.38	6.28	6.22	6.22	6.16

② T-P 변화

Alum (ppm)		0	50	60	70	80	90
Polymer (mg/L)	0.6	3.120	1.110	0.954	0.367	0.242	0.280
	0.5		1.010	0.472	0.397	0.296	0.222
	0.4		1.110	0.563	0.321	0.270	0.220

③ T-N 변화

Alum (ppm)		0	50	60	70	80	90
Polymer (mg/L)	0.6	9.98	9.27	8.24	8.57	8.46	8.38
	0.5		8.93	8.74	8.84	8.72	8.75
	0.4		8.45	8.86	8.21	8.03	7.17

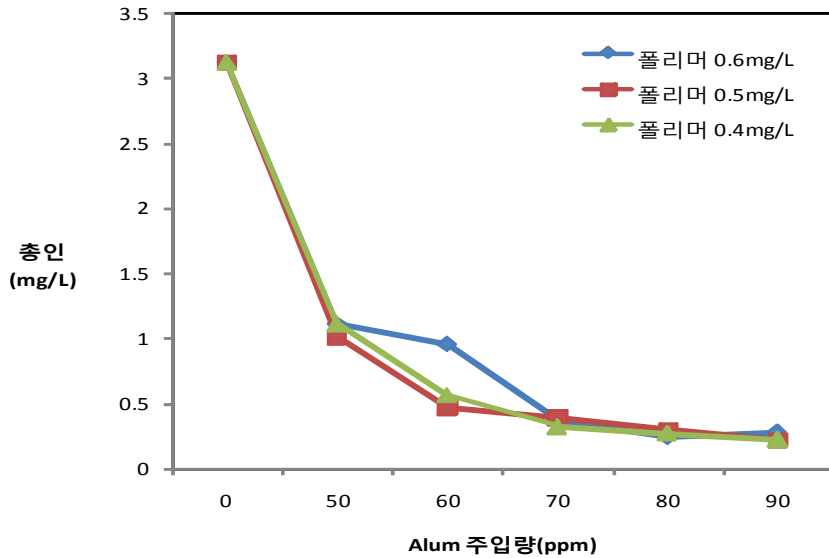


그림 5. Alum 및 폴리머 주입량에 따른 총인 변화

그림 5와 같이 폴리머 주입량에 따른 총인 제거율은 변화가 없었으며, Alum 주입률에 따른 총인 제거효율의 변화폭은 큰 것으로 나타났다. 친수 용수로 사용하기 위한 하수 재이용수의 총인 기준 0.5 gm/L을 만족하기 위한 약품 사용량은 Alum 70ppm이 적정하였으며, 폴리머의 경우에는 현장 운영조건인 0.6 mg/L 보다 0.4 mg/L로 감소시켜도 운영이 가능할 것으로 보인다.

4.2.2 pH 변화에 따른 제거효율

중량천 용수공급시설 고속응집침전 공정에서는 응집보조제로 NaOH를 주입하고 있다. NaOH 주입에 대한 현장 설계기준은 Alum 무게에 대한 NaOH 무게 비이었다. 현장 조건(NaOH 0.06kg/Alum 1kg)으로 실험한 결과 최종 반응 후 시료의 pH는 유입원수의 pH 보다 낮게 유지되었으며, NaOH 0.12kg/Alum 1kg 이상으로 주입하였을 경우 pH 6.4에서 6.7로 유입원수보다

pH는 다소 높게 나타났으며, 총인 제거율은 5~10% 상승하였다.

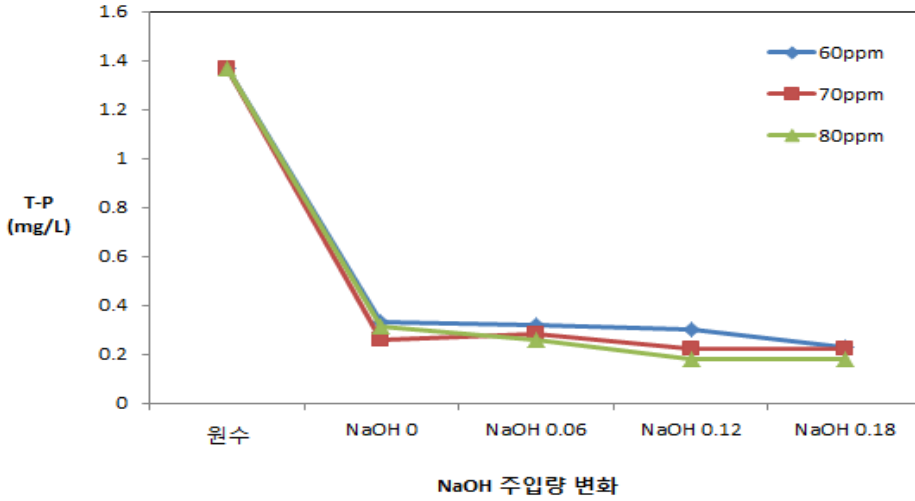


그림 6. NaOH 주입률에 따른 총인 변화

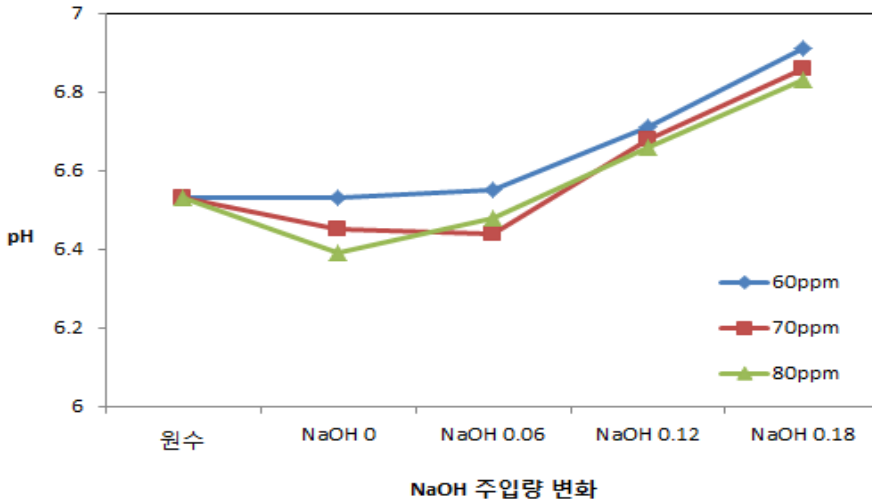


그림 7. NaOH 주입률에 따른 pH 변화

NaOH를 주입하면 응집 반응시 충분한 알칼리도를 유지할 수 있으므로

탁도의 제거율이 높아지며, 염기도가 커질수록 입자제거에 대한 선택도가 증가하여 총인 제거율이 높아지는 것으로 알려져 있다(곽중운, 1995).

4.2.3 응집제 투입 순서에 따른 총인 제거효율

고속응집침전 공정에서는 Alum 투입 후 NaOH를 응집보조제로 투입하고 있어 pH 조절지점에 따른 Alum의 효율 비교실험을 위해 1안(NaOH 투입 후 Alum 투입)과 2안(Alum 투입 후 NaOH 투입)의 경우를 각각 비교하였다.

자테스트를 통하여 응집제 투입 전·후에 NaOH를 투입하여 상등수의 pH 및 총인 제거 비교 실험을 한 결과, 그림 8과 같이 응집제 투입 전과 투입 후의 응집반응을 마친 최종 pH 값은 유사한 값이 나타났으며, 표 18과 같이 총인 제거효율 또한 두 가지 방법 모두 유사한 결과 값이 나타나 현재의 NaOH 투입 지점에 따른 총인 제거효율은 차이가 없을 것으로 판단된다.

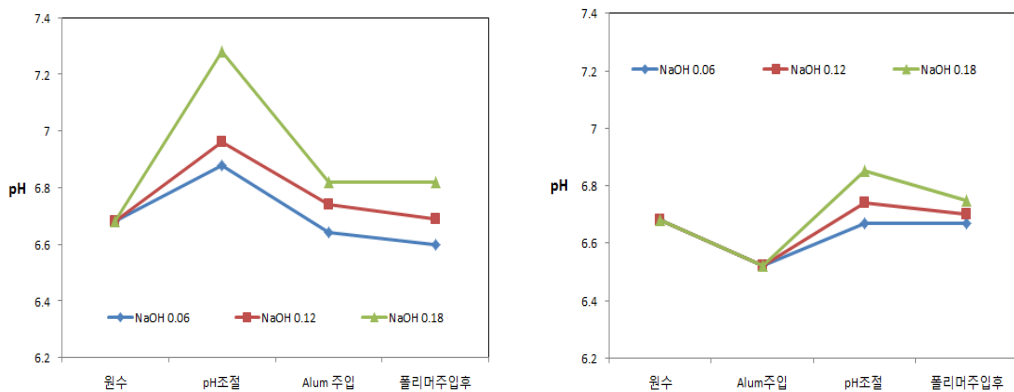


그림 8. NaOH 투입지점 및 투입량 변화에 따른 pH, 총인 농도 변화

표 18. 응집제 주입 순서에 따른 pH, 총인 농도 변화

NaOH 주입량	1안, 처리수 총인 농도(mg/L) (NaOH → Alum 주입)	2안, 처리수 총인 농도(mg/L) (Alum → NaOH 주입)
0.06:1	0.22	0.20
0.12:1	0.21	0.19
0.18:1	0.21	0.19

4.2.4 응집제별 총인 제거효율

응집제 종류에 따른 응집효율 비교를 위해 주입량에 따른 총인 제거효율을 평가하였다. 실험에 사용한 응집제는 현장에서 사용하고 있는 Alum(8% as Al₂O₃), PAC 2종(18% as Al₂O₃), PAHCS 1종(12% as Al₂O₃), 고염기도 PAC 1종(12% as Al₂O₃)을 사용하였으며, Alum은 현장 조건과 동일하게 NaOH를 주입하였고 타 응집제에 대해서는 NaOH를 주입하지 않았다.

응집제별 총인 제거효율을 살펴본 결과 PAC B 제품이 인 제거효율이 높았으며, 다음으로 PAHCS 가 높은 제거효율을 보였다. 고염기도 PAC는 응집제의 염기도 성분이 높아 응집제 주입 후 Alum, PAC 2종 등에 비해 pH 감소가 적었다. PAC 2종의 경우 pH가 가장 많이 감소되었으며, 동일한 응집제 주입량에서 모두 Alum 보다 5~20% 이상 제거효율이 높았다.

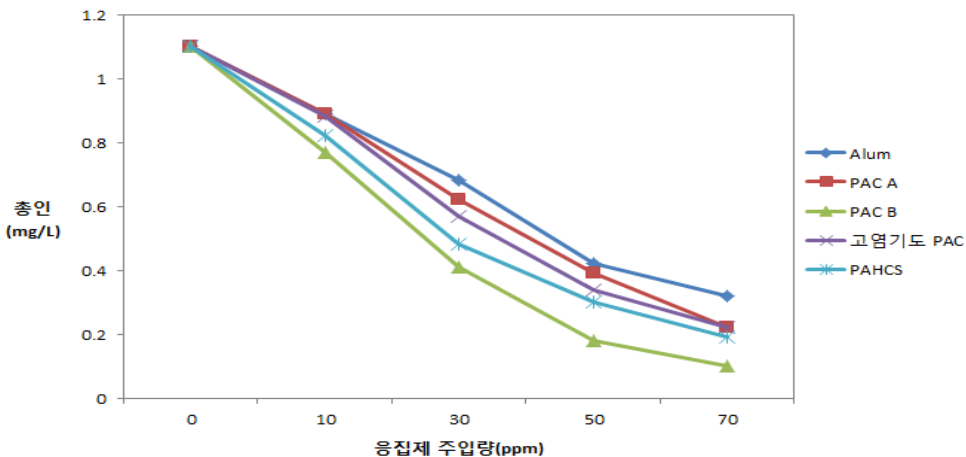


그림 9. 응집제별 총인 농도 변화

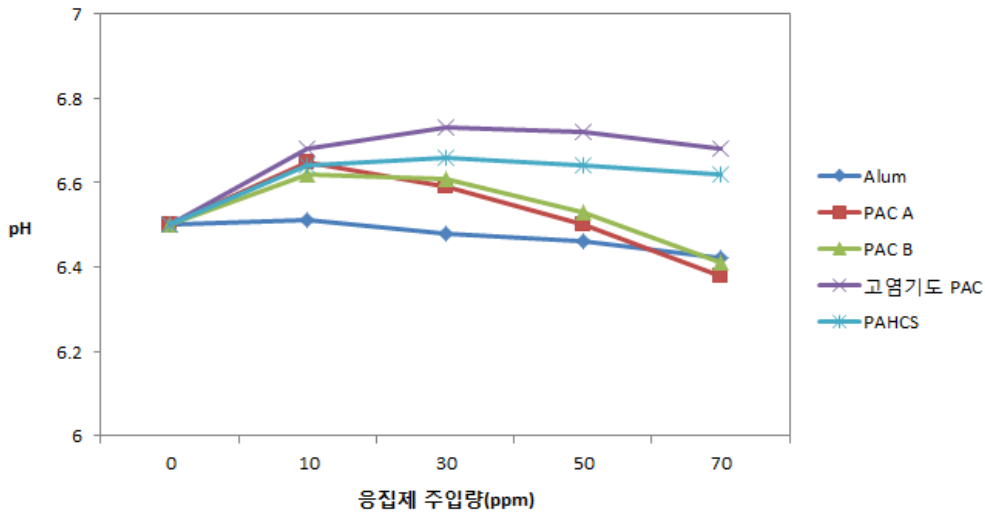


그림 10. 응집제별 pH 변화

4.3 현장 약품주입 실험 결과

4.3.1 응집제별 총인 제거효율

고속응집침전 공정 시설 총 유입량은 20만톤/일이며 A~E 5지(각 4만톤/일)로 운영 중에 있다. 그 중 A, B 두 개의 지를 선택하여 9월 ~ 12월 초까지 PAC, PAHCS로 각각 변경하여 주입하였고 기존에 운영 중인 C지의 Alum 주입 공정과 현장 비교 적용실험을 실시하였다.

응집제 주입량은 자테스트를 통해 산정된 PAC 40ppm, PAHCS 40ppm을 각각 주입하였다.

표 19와 같이 9월부터 12월까지 유입수의 총인 농도는 9월 1.13 mg/L, 10월 0.79 mg/L, 11월 0.35 mg/L, 12월 0.47 mg/L로 계절에 따른 변화가 나타났으며, 9월 이후 총인 농도는 감소하는 경향이었고, 이에 반해 SS 농도는 겨울철이 될수록 증가하였다.

SS 증가에 따른 응결핵 증가로 인한 응집효율 상승이 기대되어 PAC,

PAHCS의 주입량을 40ppm에서 35ppm으로 감소시켜 운영한 결과 친수용수 및 하천유지용수 수질기준을 만족하였다.

응집제 별 총인 제거효율을 비교한 결과 PAC>Alum>PAHCS 순으로 처리 효율이 좋았으며, 3종류의 응집제 모두 재이용수기준 0.5 mg/L 이하로 유지할 수 있었다. 이에 현장 운영 시 총인 농도와 SS 농도에 따른 약품투입량 조절이 필요할 것으로 판단된다.

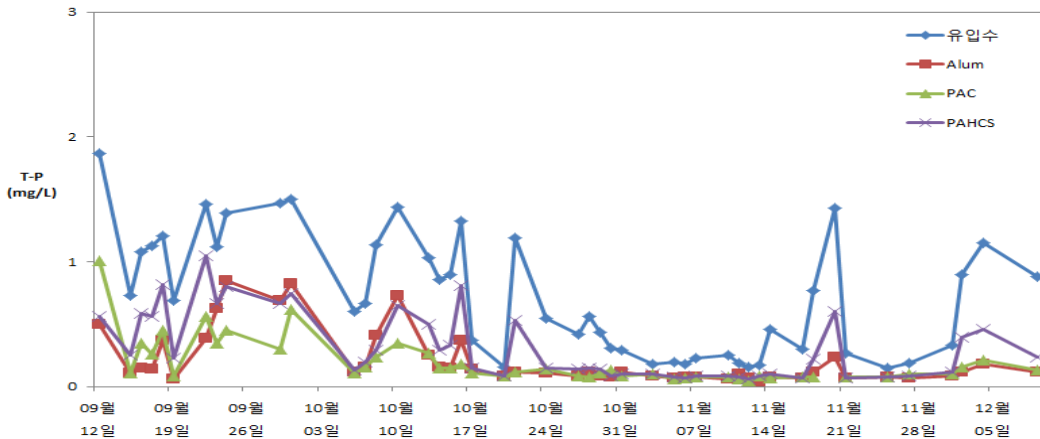


그림 11. 현장 실험 결과(총인 농도 변화)

표 19. 총인 농도에 따른 응집제별 처리효율

구 분	유입수 (mg/L)	유출수 총인 농도(mg/L)			처리 효율(%)		
		Alum	PAC	PAHCS	Alum	PAC	PAHCS
9월	1.13	0.36	0.37	0.58	68.87	69.72	49.42
10월	0.79	0.24	0.18	0.32	71.38	74.89	62.26
11월	0.35	0.09	0.08	0.13	66.54	68.45	61.90
12월	0.47	0.09	0.12	0.20	74.18	66.43	57.27
평균	0.70	0.21	0.19	0.31	69.00	70.75	58.82

4.3.2 응집제별 고형물(SS) 제거 효율

중랑천 용수공급시설로 유입되는 2처리장 고도처리수의 SS 농도를 살펴본 결과, 여름철 이후 겨울철까지 지속적으로 SS 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 계절변화에 따른 생물학적 처리효율 감소와 온도 하강에 따른 2차 침전지 침전효율 저하에 따른 영향으로 보인다. 응집제별 SS 제거 효율을 살펴본 결과, PAHCS의 경우 다른 응집제에 비해 경사판 침전지에서 미세플록 유출이 발생하여 유출수의 SS 농도가 다른 응집제에 비해 80~100% 높은 수치를 나타내었으나, 처리기준 2 mg/L 이하의 농도를 유지하였다.

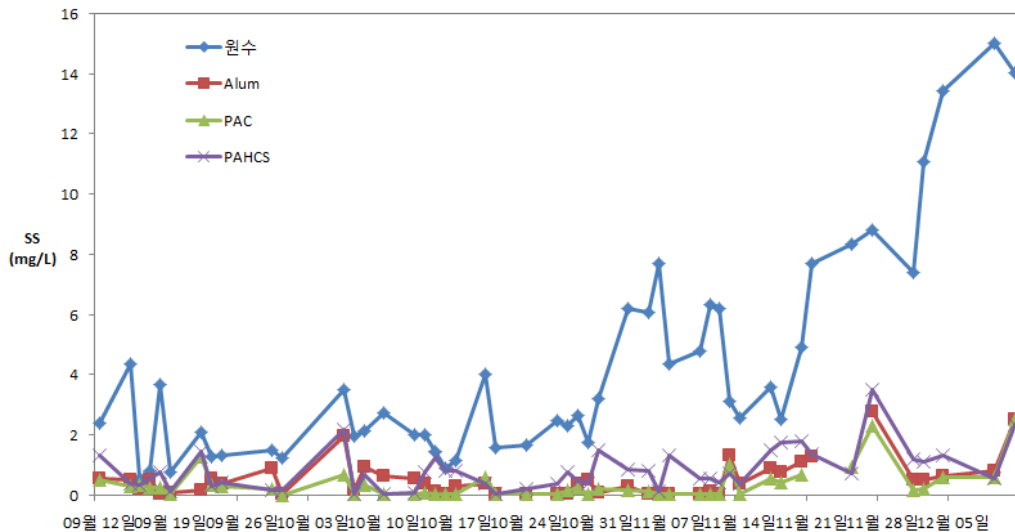


그림 12. 현장 실험 결과(SS 농도 변화)

표 20. SS 농도 및 응집제별 처리효율

구 분	유입수	유출수 SS 농도(mg/L)			처리 효율(%)		
		Alum	PAC	PAHCS	Alum	PAC	PAHCS
9월	1.81	0.36	0.34	0.54	73.40	77.10	65.85
10월	2.20	0.39	0.15	0.63	83.62	94.30	68.08
11월	5.54	0.65	0.46	1.10	87.21	91.09	77.30
12월	10.63	0.55	0.33	1.21	94.64	97.09	87.94
평균	3.75	0.47	0.31	0.80	83.07	89.28	71.85

4.3.3 응집제별 투입에 따른 pH, 알칼리도 변화

응집제 투입에 따른 유입수의 pH, 알칼리도 변화를 측정한 결과, 유입원수의 pH는 6.5~7 범위였으며, 계절적 변화는 거의 없었다. 응집제 투입 후 처리수의 pH 변화는 Alum이 가장 컸으며, 실험 대상인 두 응집제 중에서는 PAC의 pH 변화가 PAHCS보다 다소 컸다.

세 가지 응집제 중 PAHCS의 염기도가 가장 높았으며, 응집제 투입에 따른 pH 변화폭이 적은 특징을 가지고 있다. 알칼리도는 pH변화와 유사한 경향을 보였으며, PAHCS의 경우 염기도가 높아 유입원수와 처리 후의 알칼리도 변화가 작게 나타났다.

표 21. 응집제별 알칼리도 변화

종 류	원 수	Alum	PAC	PAHCS
알칼리도 범위 (mg/L as CaCO ₃)	55~75	45~65	50~70	55~70
평균	68.6	58.3	60.3	63.6

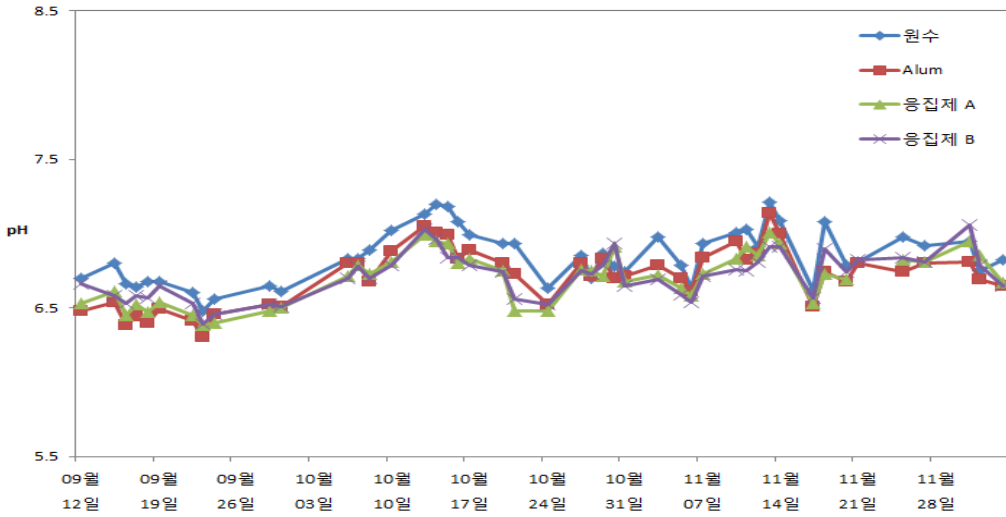


그림 13. 유입수 및 응집제 투입후 pH 변화

4.3.4 원수 성상 변화에 따른 응집제 투입량 조절

현장 실험 중 유입원수의 총인 농도가 0.3 mg/L에서 1 mg/L이상으로 증가하면서 총인 처리효율이 감소하여 응집제 투입량을 증가시킨 결과, Alum과 PAC는 원수 총인 농도가 0.89 mg/L에서 각각 0.26 mg/L, 0.19 mg/L로 낮아졌으나, PAHCS의 경우 0.35 mg/L로 다소 높게 나타났다.

유입수 총인 및 SS 농도가 증가하면서 처리효율이 감소하여 응집제 투입량을 증가시킨 결과, 원수의 SS 평균 농도가 2.04 mg/L에서 Alum과 PAC는 각각 0.28 mg/L, 0.19 mg/L로 낮아졌으며, PAHCS의 경우 0.45 mg/L로 Alum과 PAC에 해 처리효율이 낮았다.

표 22. 응집제 투입량 변화에 따른 총인 제거율(%) 변화

종류	주입량(ppm)	총인 제거율(%)	주입량(ppm)	총인 제거율(%)
Alum	70	45.3	80	85.6
PAC	35	70.6	40	85.8
PAHCS	35	56.7	40	68.0

표 23. 응집제 주입률 변화에 따른 SS 제거율(%) 변화

종류	주입량(ppm)	SS 제거율(%)	주입량(ppm)	SS 제거율(%)
Alum	70	76.6	80	98.4
PAC	35	98.4	40	97.8
PAHCS	35	97.4	40	70.3

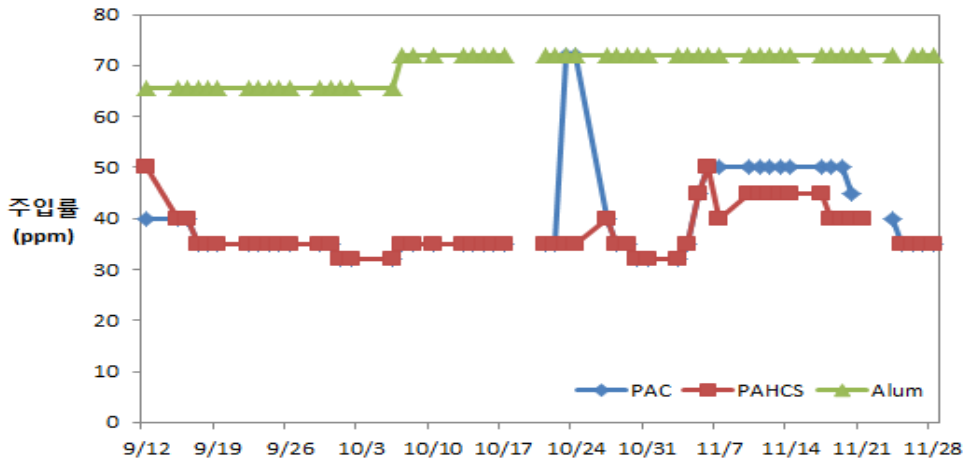


그림 14. 현장 실험 기간 중 약품주입량 변화

4.4 경제성 평가

현장 실험을 통해 최적 응집제 주입량에 따른 처리비용과 각 응집제별 전력사용량에 따른 전력비를 비교해 보았다.

약품주입량에 따른 경제성을 계산한 결과 PAC>Alum>PAHCS 순으로 PAC가 가장 경제성이 뛰어났다. 펌프사용에 따른 전력비의 경우 PAHCS는 실험기간 중 슬러지 반송시 효율저하로 침전된 슬러지를 반송하지 않아 전력사용량이 가장 적었다.

약품주입량과 펌프사용에 따른 경제성 비교 시 약품사용량이 전체 금액의 대부분을 차지하고 있어 약품사용량이 경제성의 중요한 요인이었다.

표 24. 약품주입량에 따른 경제성 비교

구 분	항 목	PAC	PAHCS	Alum	
원수	처리량(m ³ /일)	200,000	200,000	200,000	
응집제	주입량(ton/일)	8	8	14	
	단가(ton)	189,000	223,300	93,000	
	금액(원)	1,512,000	1,768,400	1,339,200	
응집 보조제	NaOH	주입량(ton/일)	-	-	3
		단가(원/ton)	129,800	129,800	129,800
		금액(일/원)	-	-	389,400
	폴리머	주입량(ton/일)	80	80	80
		단가(원/ton)	3,685	3,685	3,685
		금액(원)	294,800	294,800	294,800
	소 계		294,800	294,800	684,200
	총 금액(천원/일)		1,806,800	2,081,200	2,023,400

표 25. 1지당 펌프 가동 금액

구 분	PAC	PAHCS	Alum
약품펌프 용량(kW)	0.4	0.4	0.4
약품펌프 가동 전력량(kWh)	1.79	1.99	4.14
수산화나트륨펌프 용량(kW)	0.4	0.4	0.4
수산화나트륨펌프 가동 전력량(kWh)	0	0	3.26
폴리머펌프 용량(kW)	0.75	0.75	0.75
폴리머펌프 가동 전력량(kWh)	7.60	7.60	7.2
반송슬러지량(m ³)	800	600	800
반송슬러지펌프 용량(kW)	7.5	7.5	7.5
반송슬러지펌프 가동 전력량(kWh)	117.65	88.24	117.65
잉여슬러지량(m ³)	190.4	240.8	201.6
잉여슬러지펌프 용량(kW)	3.73.7	3.7	3.7
잉여슬러지펌프 가동 전력량(kWh)	16.78	21.21	17.76
총 전력량	143.81	119.03	150.00
연간 전력량 비교	52,490	43,446	54,751
연간 전력량 요금 비교	5,249,047	4,344,625	5,475,053

5 결론

하수 고도처리수를 재이용하여 친수용수 및 하천유지용수로 활용중인 고속응집침전 공정의 효율적인 운영방안을 위해 기존에 운영 중인 응집제, 응집보조제에 대한 평가를 실시하였으며, 현재 주입중인 Alum과 실험 응집제를 비교하는 실험실 자테스트(Jar-Test) 및 현장 실험을 통한 결과는 다음과 같다.

1. 고속응집침전 공정을 검토한 결과 Alum 70ppm 및 폴리머 0.4mg/L로 운영시 재이용수 수질기준을 만족할 수 있을 것으로 예상되며, 주어진 농도에서 NaOH의 주입지점 변경을 통한 처리효율은 큰 차이가 없었으므로 주입지점 변경 없이 운영하는 것이 타당할 것으로 판단된다.
2. 현장 실험 결과, 응집제별 평균 총인 처리효율은 PAC>Alum>PAHCS 순으로 PAC가 70.75%로 가장 높았으며, 처리수 총인 농도는 0.19~0.31 mg/L로 재이용수 기준 0.5 mg/L의 1/2 수준이었으며, 응집제별 SS 제거효율은 PAC>Alum>PAHCS 순으로 PAC가 89.28%로 가장 높았고, 처리수 SS 농도는 0.31~0.80 mg/L로 재이용수 기준 6 mg/L 이하의 1/10 수준이었다.
3. 안정적 수질을 얻기 위한 응집제 주입량, NaOH 사용량, 반송에 따른 전력량 등의 경제성 평가 결과 PAC>Alum>PAHCS 로 PAC가 가장 경제적인 것으로 나타났다.
4. 약품에 따른 현장 운영 관리상의 특성을 살펴보면, Alum의 경우 NaOH를 상시 사용하여야 하고, PAC는 필요시 NaOH를 투입하므로 NaOH 관리에 따른 현장 운영자의 주의가 요구되며, 원수 변화에 따라 약품 주입량 조절이 필요한 반면, PAHCS는 NaOH를 첨가하지 않고 운영이 가능하였으며, 유입원수 변화에 따라 처리효율이 일정하게 유지되어 현장 운영 시 가장 유리한 특성을 보였다.

참고문헌

1. 환경부, 2013, 물재이용 시설 설계 및 유지관리 가이드라인
2. 환경부, 2012, 하수도 통계
3. 환경부, 2011, 물재이용 기본계획
4. 환경부, 2007, 하수처리수 재이용 가이드 북
5. 환경부, 2005, 하수도시설기준, 환경부, pp 489~490, 498~510
6. 환경부, 2008, 수질오염공정시험기준, 환경부
7. 환경부, 2009, '08년도 공공하수처리시설 운영관리 실태분석 결과, 환경부
8. 한국환경공단, 2012, 인 처리시설 처리효율 개선을 위한 고려사항
9. 지용근, 안종호, 이진희, 2012, 하수처리수 재이용을 통한 도시하천 물순환 및 수질 개선, 상하수도학회지, Vol 26, No 2, pp 285~294
10. 김용성, 최병습, 박세출, 조재원, 2013, 지속가능 순환형 물 재이용을 위한 도시 무방류시스템, 한국물환경학회, Vol 27, No 2, pp 275~283
11. 곽종운, 1995, 하수처리에서 응집제의 염기도가 인 제거에 미치는 특성, 한국수처리학회지, 3권 4호, pp 57~67
12. 김갑수, 김동하, 김주영, 2000, 하수의 고도처리기술, 동화기술, pp 56~109
13. Metcalf & Eddy, 1997, Wastewater Engineering(Third edition), McGraw-Hill, Inc., pp 248~274, 655~679
14. 김영철, 장인성, 이동률, 2003, 하수 처리장 2차 처리수 재이용을 위한 처리시설의 기초 설계인자 및 구상, 대한환경공학학회지, 논문, pp 946~954
15. 조일형, 이시진, 김지태, 2013, 대체수자원 확보를 위한 하수재이용 기술 동향과 발전방향, 한국물환경학회, Vol 19, No 1, pp 127~137
16. CALIFORNIA WATER BOARDS, 2013, ACCOMPLISHMENTS REPORT(March, 2014)
17. Daniel Newton, RESULTS, CHALLENGES, AND FUTURE APPROACHES TO CALIFORNIA'S MUNICIPAL WASTEWATER RECYCLING SURVEY