

碩士學位論文

하수처리장 방류수의 재이용을 위한
2단 PCF/RO 적용에 관한 연구



濟州大學校 大學院

環境工學科

朴 炯 建

2008年 2月

하수처리장 방류수의 재이용을 위한 2단 PCF/RO 적용에 관한 연구

指導教授 李 容 斗

朴 炯 建

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 2月

朴炯建의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

甘 相 奎

委 員

李 起 浩

委 員

李 容 斗

濟州大學校 大學院

2008年 2月

A study on the Application of Two Stage PCF/RO for Reuse of Effluent from Sewage Treatment Plant

Hyoung-Gun Park
(Supervised by professor Yong-Doo Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for
the degree of Master of Engineering

2008. 2

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Sang-Kyu Kam, Prof of Environmental Engineering

Thesis director, Ki-Ho Lee, Prof. of Environmental Engineering

Thesis director, Yong-Doo Lee, Prof. of Environmental Engineering

February. 2008

Department of Environmental Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

| | |
|---|-----------|
| Summary | vi |
| I. 서론 | 1 |
| II. 이론적 고찰 | 4 |
| 1. 제주도의 수자원 이용특성 및 하수발생 현황 | 4 |
| 1) 용수사용 현황 | 4 |
| 2) 하수발생 현황 | 5 |
| 2. 하수처리장 방류수 재이용을 위한 처리공정 | 6 |
| 1) 응집이론 및 혼화공정의 특성 | 6 |
| 2) 여과이론 및 PCF의 특성 | 9 |
| 3) 역삼투막의 특성 | 15 |
| 3. 경제성분석 | 18 |
| III. 실험장치 및 방법 | 20 |
| 1. 실험장치 | 20 |
| 2. 분석항목 및 방법 | 21 |
| IV. 결과 및 고찰 | 24 |
| 1. 하수처리장 방류수의 수질특성 | 24 |
| 1) Cl^- 농도와 E.C간의 상관성 및 Cl^- 농도의 추정 | 25 |
| 2. 최적 운전조건의 결정 | 27 |
| 1) 혼화방식에 따른 처리효율 | 27 |
| 2) 응집제 주입량 변화에 따른 수질특성 | 29 |
| 3) 역세후 수질 회복 특성과 안정화평가 | 39 |
| 4) RO시스템의 적용과 수질특성 | 43 |

| | |
|--------------|----|
| IV. 결론 | 45 |
| 참고문헌 | 47 |
| 부록 | 50 |

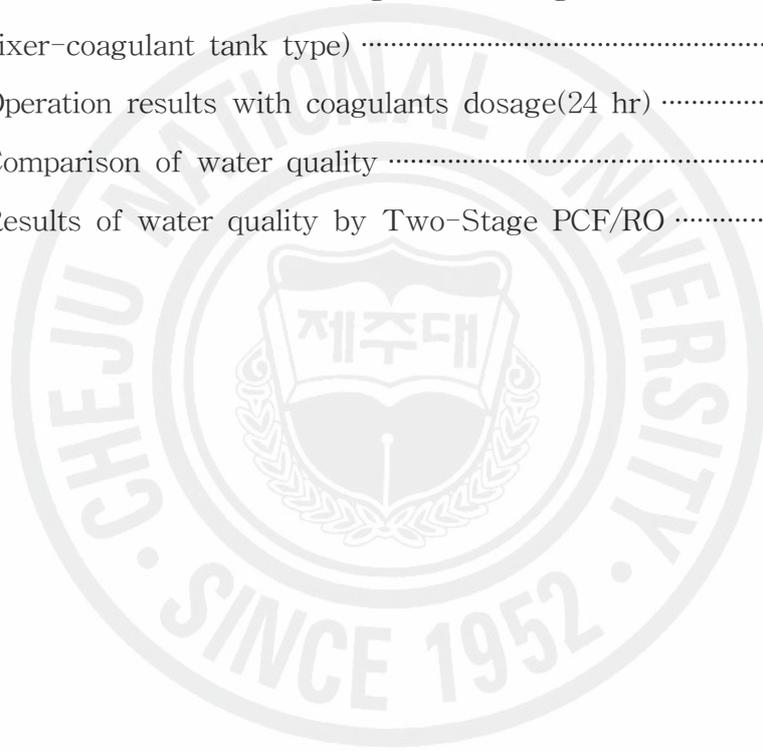


List of Figures

| | |
|--|----|
| Fig. 1. Variation of Precipitation during 1987 ~ 2006. | 4 |
| Fig. 2. Description of Al species with progressive polymerization. | 7 |
| Fig. 3. Inline mixer element. | 8 |
| Fig. 4. Pore of media and floc removal in sand filter. | 10 |
| Fig. 5. Mechanism of filtration. | 10 |
| Fig. 6. Schematics diagram of filtration and backwashing. | 14 |
| Fig. 7. Comparison of the size of the constituents found in wastewater and the operating size ranges for membrane. | 16 |
| Fig. 8. Mechanism of reverse osmosis. | 16 |
| Fig. 9. Schematic diagram of pilot plant. | 20 |
| Fig. 10. Correlation between E.C and Cl^- Concentration. | 25 |
| Fig. 11. Estimation of Cl^- Concentration. | 26 |
| Fig. 12. The variation of turbidity and flux with PAC dosage. | 31 |
| Fig. 13. The variation of turbidity with PAC dosage. | 32 |
| Fig. 14. The variation of pH and Cl^- removal with PAC dosage. | 34 |
| Fig. 15. The variation of SS and UV_{254} removal with PAC dosage. | 35 |
| Fig. 16. The variation of T-N and T-P removal with PAC dosage. | 36 |
| Fig. 17. The variation of SDI_{15} and COD removal with PAC dosage. | 37 |
| Fig. 18. The variation of Alkalinity with PAC dosage of coagulants. | 38 |
| Fig. 19. The variation of turbidity and flux. | 40 |
| Fig. 20. The variation of water quality of STP effluent and two-stage PCF effluent. | 41 |
| Fig. 21. The variation of quality before and after Two-stage PCF/RO Process . | 43 |

List of Tables

| | |
|--|----|
| Table 1. Diffusion, sedimentation, Interception by particle size | 11 |
| Table 2. Reuse plant operating cost in sewage effluent scale | 19 |
| Table 3. Analytical methods of water quality | 22 |
| Table 4 Characteristics of effluent from S Sewage Treatment Plant | 24 |
| Table 5. Relation between PAC dosage and fouling index(Inline mixer type) | 28 |
| Table 6. Relation between PAC dosage and fouling index (Inline mixer-coagulant tank type) | 28 |
| Table 7. Operation results with coagulants dosage(24 hr) | 29 |
| Table 8. Comparison of water quality | 42 |
| Table 9. Results of water quality by Two-Stage PCF/RO | 44 |



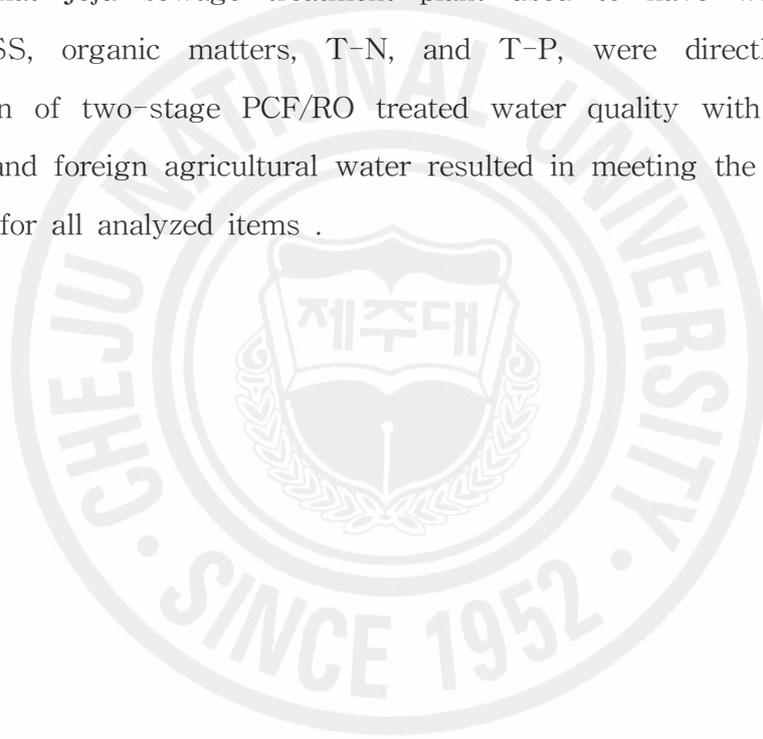
Summary

In order to reuse effluent water from Jeju sewage treatment plant, it is necessary to eliminate a highly concentrated Cl^- which causes the considerable problems in some areas. Using RO system is considered the best method to get rid of it. As for the pretreatment process, this study is to examine the validity and optimal operating conditions with the fiber filter used in coagulation-sedimentation process. In terms of producing the alternative water resources, this study presented the water quality problems stemming from reuse to understand the reuse potential of the sewage treatment plant(STP) effluent water for agricultural purpose, and also presented the conditions for the stable operation of two-stage PCF/RO that is introduced to solve such problems. In addition, the possibility that the treated water in the two-stage PCF/RO can be used as agricultural water was examined and compared with other standards for overseas and domestic agricultural water. And the following conclusions have been achieved;

1. Based on the results on the optimal condition assessment according to coagulants dosing of two-stage PCF, and water quality analysis using low SDI15 and COD for fouling prevention, it is determined that 9 ml/min dosage is the most stable and effective from the economical aspects depending on filter-run-time
2. Results of the 528 hr operation of two-stage PCF are shown to be adequate for RO pretreatment process because the system did not cause the "breakthrough" effect. Results also indicated the SDI15 below 3.0 and stable treated water, which is appropriate for the application of RO.

3. It is concluded that if the concentration of Cl^- and T-N in effluent water is less variable and the target water quality is met, just using two-stage PCF can satisfy the water quality condition for reused water with multi-purpose.

4. Investigation result on adequate treatment when two-stage PCF-treated water was flowed into RO system showed that not only the system was stably operated without any pressure change, but also the excessive Cl^- problem that Jeju sewage treatment plant used to have was solved. In addition SS, organic matters, T-N, and T-P, were directly eliminated. Comparison of two-stage PCF/RO treated water quality with standard for domestic and foreign agricultural water resulted in meeting the water quality standards for all analyzed items .



I. 서론

장래 부족해질 수자원에 대한 대책으로써 수년 전까지만 하더라도 주로 대형 댐 또는 저수지를 축조하여 수자원을 확보하는 정책을 펴왔지만, 수몰지역주민들의 반대, 높은 용지보상비, 댐 축조 장소의 감소, 환경 파괴 논란 등으로 인해 대형 댐을 축조한다는 것은 그리 용이하지 않게 되었다. 따라서 수자원확보가 거의 한계에 다다른 요즘에는 물 절약, 물의 효율적 이용 등의 물 수요관리를 통해 대처하려는 정책을 취하고 있다. 하지만 물 절약 또는 개별중수도의 설치 등에 의한 물수요관리는 어느 정도의 수자원 증대효과를 볼 수 있지만, 점차 증가하는 물 수요를 충족하기에는 한계가 있다.¹⁾ 이에 농업용수·조경용수 등 좋은 수질을 필요로 하지 않는 용도에 대해서는 지표수·용천수·하수처리장 방류수 재이용 등 여러 가지 방안이 검토되고 있다. 이중 하수처리장 방류수 재이용은 갈수기에 안정적으로 유량을 확보할 수 있는 이점과 고도처리시설의 도입에 따라 양질의 방류수가 연중 방류되기 때문에 이를 적절히 활용하면 수자원의 개발을 최대한으로 줄이고 물부족 사태를 강하게 대처할 수 있다. 이외에도, 수계에 방류되었을 때 발생할 수 있는 수질문제를 경감시켜 오염부하 저감측면과 수질오염총량관리제 시행지역에서는 가장 효과적인 오염부하량 삭감 수단이고, 재이용과 관련된 설계·설비·건설·유지관리 분야를 제3의 물 산업(The Third Water Utility)으로 집중 육성함으로써 직간접적인 고용창출효과를 유발하는 등의 이점이 있다.^{2,3)}

2000년 환경부에서는 하수처리장 방류수를 2010년까지 10% 이상 재이용하겠다는 방침을 발표하였고, 이 후 기존에 그대로 하천에 방류하던 하수처리장 방류수를 공업용수 및 농업용수 등으로 공급하여 새로운 수자원으로 이용하는 「하수처리수 재이용 촉진 시범사업(2005. 12)」을 추진하고 있으며, 2006년 하수도법을 개정하여 신규 하수처리장의 하수처리수 재이용 의무화 등 새로운 수자원으로 하수처리장 방류수 재이용을 널리 확산시키고 있다. 우리나라의 하수처리장 방류수 재이용 현황을 살펴보면 2005년 전국적으로 운영중에 있는 하수처리장은 294개소로 연간 66.4억톤의 하수처리량 중 4.6억톤을 재이용(6.9%)하여 이중 절반은 처

리장내 청소수, 세척수, 냉각수 등으로 나머지는 주로 하천유지용수, 농업용수 등으로 재이용하였다.³⁾

방류수 재이용을 위한 국외의 연구로는 Hamoda 등⁴⁾은 모래여과를 통한 하수 2차처리수의 처리에서 TSS(Total suspended solids)와 COD(Chemical oxygen demand), BOD(Biochemical oxygen demand)가 각각 70%, 38%, 54%의 제거율을 얻었다고 발표하였고, Fahmi 등⁵⁾은 지표수와 하수 2차 처리수를 AOP(Advanced Oxidation Process)와 생물학적 처리를 통하여 DOC(Dissolved Organic Carbon)를 각각 62%와 41%를 제거하였다. 국내 연구로는 안 등⁶⁾이 하수처리장 2차 처리수를 대상으로 자외선 System을 적용하였으며, 이 등⁷⁾은 하수처리장 방류수의 재이용을 위한 응집-직접여과 공정을 수행하였다. 하수처리공정의 개선과 고도처리시설의 도입 그리고 처리효율의 증대와 막공정(Membrane process) 기술개발, 경제적 비용의 감소로 인해 막 단독에 의한 처리와 막과 기존의 처리공정과 조합한 혼합공정에 대한 연구도 진행되고 있다. Tam 등⁸⁾은 Membrane bioreactor(MBR)/RO와 MF/RO를 생하수와 2차처리수에 각각 적용하여 처리한 결과 USEPA와 WHO 먹는물수질 기준치보다 우수한 RO투과수를 얻었다고 발표하였고, Melin 등⁹⁾은 Membrane bioreactors(MBRs)을 이용하여 도시하수의 처리와 재이용에 사용하였다. 이 외에 박 등¹⁰⁾이 산소활성오니-응집공정 처리수의 재이용을 위하여 막분리 공정의 처리특성을 보았으며, 이¹¹⁾는 하수처리장 2차유출수를 재이용하기 위하여 UF를 전처리장치로 사용하고, 최종적으로 RO, NF 막을 이용하여 여과수의 SAR(Sodium Adsorption Ratio) 값을 비교하여 2차 유출수 재이용에 적합한 막분리 공정에 대한 선택지침을 마련하였다. 이외에도 사여과와 활성탄 흡착,¹²⁾ 생물필터¹³⁾ 등 많은 연구가 수행되고 있다.

제주도 하수처리장 방류수의 수질 중 가장 큰 특징은 내륙지방 하수처리장에 비하여 매우 높은 Cl^- 의 농도로 지하수범상 농업용수 수질기준(250 mg/L)³⁾을 초과하고 있다. 제주도 하수처리장 방류수 재이용에 대한 연구는 이미 진행된 상태로, Cl^- 의 제거를 위해 Back-Washable Micro Filter(BMF)-RO를 적용하였다. 적용 결과 양질의 처리수를 얻을 수 있었고, m^3 당 생산원가도 285.5원(1일 50,000 m^3 기준)으로 상수도 생산원가(270원, 농업용수 51 ~ 100 m^3 기준)와 비슷한 수준을 보였다.¹⁴⁾ 하지만 방류수량이 많지 않은 농촌지역 하수처리장을 대상으로

하면 생산원가는 상수도 생산원가를 초과하여 비경제적이 되어 새로운 System 개발이 요구되고 있다. 제주도라는 지역적 실정에 맞는 System 개발시 고려사항으로는 기존 부지의 활용과 운전이 비교적 용이하고 시설의 설치와 경제성, 전문 인력이 필요치 않은 간편한 운전이 가능해야 하며 마지막으로 CI⁻의 제거이다. 현재 개발된 기술 중 위 사항을 만족할 만한 기술은 처리효율이 높고, 운전이 간단하며, 높은 안정성과 많은 적용실적을 갖고 있는 RO를 사용하는 것이 가장 적절하다 판단되고, 이를 위한 막 fouling 방지와 전체공정의 경제성을 실현시키기 위하여 적절한 전처리장치의 도입이 필요하다 생각된다. 전처리장치로는 모래여과, 활성탄여과, 정밀여과 등¹⁵⁾이 있지만, 모래여과의 경우 여과속도가 낮고, 주기적인 여과사의 삭취 또는 역세척이 필요하고, 역세척에 사용되는 역세척수의 양과 이를 처리하기 위한 슬러지처리장치 등의 부대시설이 있어야 하는 등 넓은 부지면적이 필요하다. 활성탄여과의 경우는 파과시점이 불분명하고, 활성탄교체라는 유지관리비가 많이 들며, 자동화에 유리하지 않다. 정밀여과의 경우 가장 효과적인 전처리장치이지만 효과적인 운영을 위해서는 이것 역시 fouling 방지를 위한 전처리시설을 도입해야하며, 분리막교체라는 유지관리비용이 많이 드는 단점들이 있다. 이에 최근 하수처리장 방류수의 부유물질 제거¹⁶⁾와 정수공정의 응집-침전공정의 대체 가능성이 확인된¹⁷⁾ 섬유사여과기를 RO전처리공정에 적용하고자 한다. 섬유사여과기는 여과속도가 빠르고, 장치의 소형화, 경량화, 운전의 자동화가 가능하며 유지비용이 저렴한 여과장치이다. 여과성 flocc을 형성하여 직접여과하는 방식이라 응집제 소요량이 적게 들며, 역세척수 발생비율이 생산수량의 5% 수준이고 이것 역시 처리장 유입구로 이동시키기 때문에 슬러지처리시설 등의 부대시설이 필요없다.

이에 본 연구는 대체수자원 확보 측면에서 하수처리장 방류수의 농업용수로의 재이용 가능성을 파악하기 위해 재이용에 따른 수질적인 문제점과 이를 해결하기 위해 도입된 2단 PCF/RO의 안정적인 운전조건을 도출하였다. 이와 더불어 2단 PCF/RO 처리수의 농업용수로의 이용 가능성을 국내외 농업용수 기준과 비교하여 평가하였다.

II. 이론적 고찰

1. 제주도의 수자원 이용특성 및 하수발생 현황

1) 용수사용 현황

제주의 지하수 개발·이용 현황을 보면 2005년 말 기준 4,976공의 관정이 개발되어 1일 최대 약 160만 톤을 사용할 수 있는 용수를 확보하고 있다. 이 중 농수축산용 용수가 전체 이용량의 57%인 92만 톤을 사용하고 있으며, 다음으로는 생활용수가 전체 이용량의 40%인 약 64만 톤을 사용하고 있다. 이는 적정개발량의 90% 수준으로 점차 증가하는 추세에 있다.¹⁸⁾ 이런 지하수는 강수에 원천을 둔 순환자원으로 강수량의 변동에 따라 수량 변화가 크게 발생한다.

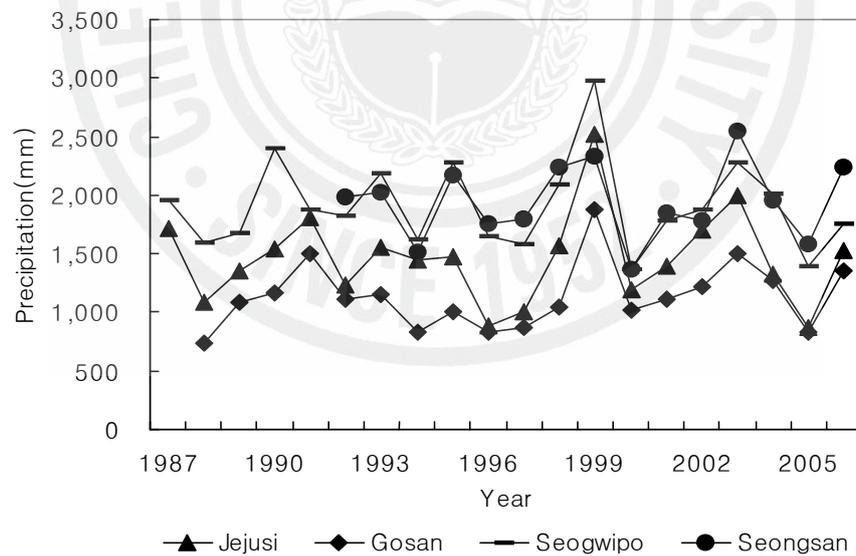


Fig. 1. Variation of precipitation during 1987 ~ 2006.

1987년 ~ 2006년까지 20년간 제주, 고산, 서귀포, 성산포의 연평균강수량(산술 평균)은 1460.8 mm, 1132.7 mm, 1929.5 mm, 1943.8 mm로 지역별 차이도 크지

만 과우년과 다우년의 편차도 매우 크다는 것을 알 수 있다. 1987년 ~ 2006년까지의 연도별 강수량을 Fig. 1에 나타내었다. 이처럼, 지하수자원의 수량적 변동이 크게 발생하고 있음에도 불구하고, 제주도의 용수이용은 전적으로 지하수에만 의존하고 있어 다음과 같은 문제가 발생할 수 있다. 그 첫 번째가 극단적인 이상 가뭄시에는 지하수를 대체할 수 있는 수자원이 없어 물 부족으로 인한 사회적인 혼란과 막대한 경제적 손실이 발생할 수 있고, 두 번째가 지하수 함양량이 부족한 가뭄 시점에 평상시 수준으로 지하수를 채수할 경우 해안지역 지하수로 해수가 침투하는 현상이 발생해 지하수의 염수화를 초래할 수 있다. 세 번째는 이상 가뭄 시 이를 극복하기 위한 농업용 등 관정개발사업이 특혜적으로 이루어질 경우 지하수관리체계의 일관성 유지가 어렵게 될 수 있다.¹⁴⁾

제주국제자유도시특별법 제33조 및 시행조례 제45조의 규정에 의하여 지하수가 과다 개발되어 이용되고 있거나, 지하수위 강하·해수침입·수질오염 등의 우려가 있는 지역을 지하수자원특별관리구역으로 지정하여 지하수 개발제한, 지하수 개발·이용허가 기간의 제한, 지하수 취수량 제한 등 지하수자원을 특별관리하고 있다. 지하수자원특별관리구역은 노형 ~ 신촌구역, 무릉 ~ 상모구역, 하원 ~ 법환구역, 서귀 ~ 세화구역 등 4개의 구역으로 구성되며, 전체 지정 지역의 면적은 제주도 총 면적의 8.7%이다. 제주도지하수관리계획에 의하면 2011년에 20.6만 m³/일이 부족할 것으로 추정하고 있으며, 지역별로는 구제주시가 9.5만m³/일, 구서귀포시가 4.4만 m³/일, 구북제주군이 3.5만 m³/일, 남제주군이 1.3만 m³/일이 부족할 것으로 분석하였다.¹⁸⁾

2) 하수발생 현황

하수도 이용현황은 2005년 12월말 기준 인구 면에서는 도 전체적으로 72.3%의 처리율을 보이고 있으며, 지역별로는 제주시가 73.4%로 서귀포시의 69.4%에 비해 높은 처리율을 보이고 있다. 전국평균은 83.5% 이다. 시설 면에서는 도 전체적으로 67.9%의 시설율을 보이고 있으며, 제주시가 66.8%, 서귀포시가 69.7%의 시설율을 보이고 있다.

대규모 하수처리장은 제주도내에 제주하수처리장, 중문하수처리장, 보목하수처리장, 서부하수처리장, 성산하수처리장 등 모두 5곳이 운영 중에 있으며, 제주하

수처리장은 1일 처리용량 13만 m³로 가장 큰 용량을 가지고 있고, 농어촌에 위치한 하수처리장의 경우 4천 m³ ~ 2만 m³의 처리용량을 가지고 있다. 제주도전체 1일 하수발생량은 11만 m³으로 이는 상수도 총급수량(19만 m³)의 58%이고, 이중 2.7%만이 냉각수, 처리장내 청소수, 세척수로 사용되고 있고 나머지는 인근 해역으로 방류되고 있다.³⁾

2. 하수처리장 방류수 재이용을 위한 처리공정

하수처리장 방류수 재이용 기술은 목적 용수의 생산에 따라 다양하게 적용되는데, 고액분리공정-소독공정을 하나의 공정으로 하는 간단한 공정에서부터 물리, 화학, 생물학적처리 공정이 결합한 다중프로세스(Multi process)와 같은 복잡한 공정도 적용되고 있다. 이외에도 오존, UV, H₂O₂ 등을 이용한 고급산화공정(AOP : Advanced oxidation process) 및 보다 높은 재이용수 수질을 얻을 수 있는 정밀여과(MF), 한외여과(UF)등을 이용한 막분리공정 등이 있다. 최근의 재이용을 위한 처리공정은 단순한 입자상 오염물질의 제거뿐만 아니라 재이용수의 적용 목적에 따라 그 처리공정이 달라지며, 이러한 공정의 적용을 위해서는 제거하고자 하는 물질에 따라 적용될 수 있는 각각의 단위 공정이 우선 선정되어야 한다.

1) 응집이론 및 혼화공정의 특성

(1) 응집이론

하수처리장 방류수는 다양한 크기의 부유물질 및 콜로이드 물질을 함유하고 있다. 응집은 이러한 하수방류수에서 0.1 ~ 10 μ m 크기의 입자상물질과 콜로이드 물질을 제거하는 것이다. 수중에 존재하는 오염물질의 상태는 입자상인 콜로이드 물질과 용해성물질 그리고 콜로이드상의 불순물로 분류할 수 있는데, 이들 중 콜로이드물질과 용해성 물질을 다시 화학적 조성으로 구별할 때 무기물과 유기물

로 나눌 수 있다. 물의 탁도를 유발하는 것은 콜로이드상의 물질인 무기물에 의한 것이 대부분이며, 천연유기물(NOM) 중 Humic acids가 콜로이드 또는 고분자 형태로 탁도에 기여하는 것으로 알려져 있으며, Fulvic acids는 용해성 물질로 분류되고 있으나 고분자화될 경우, 콜로이드 불순물로 작용하여 탁도를 높인다.

응집기작은 여러 가지가 있는데 크게 Charge neutralization와 Sweep flocculation으로 요약할 수 있고, Charge neutralization는 음으로 치우쳐 있는 콜로이드 입자의 전하를 양이온의 투여에 의해 중화시키는 것이고, Sweep flocculation는 응집제가 물에 용해될 때 생성되는 침전성물질이 콜로이드 입자와 결합하여 더 큰 floc을 형성하는 것이다. 응집제 투여량과 응집 pH는 생성되는 가수분해 화학종, 응집 메커니즘 및 응집 성능에 영향을 미치는 가장 중요한 인자들이다.

물에 Al이 투입될 때 알칼리를 소모하는 가수분해반응을 일으켜 최종적으로 고체상인 $Al(OH)_3$ 으로 전환된다. 그러나 실제 수화되는 과정에서는 pH와 수온, Alkalinity 등의 변수에 따라 여러 종류의 이온종이 생성될 수 있다. 특히 5종의 단량체 이온종으로 $Al^{3+}(aq)$, $Al(OH)_2^{3+}(aq)$, $Al(OH)_3(\text{Amorphous})$, $Al(OH)_4^-(aq)$ 등이 생성되며, 고분자 이온종으로는 $Al_2(OH)_2^{4+}$, $Al_3(OH)_4^{5+}$, $[Al_{13}O_4(OH)_{24}]^{7+}$ (most stable, 이하 Al_{13} 으로 표기)이 생성되고, 고체 침전물로 $Al(OH)_3(\text{Gibbsite})$ 이 대표적이라고 할 수 있다.

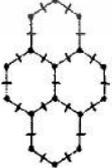
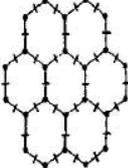
| | | | | | | | | |
|-------------------|---|---|---|---|---|--|---|---|
| |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Average charge/Al | Al^{3+} | $Al_2(OH)_2^{4+}$ | $Al_3(OH)_4^{5+}$ | $Al_6(OH)_{12}^{5+}$ | $Al_9(OH)_{18}^{9+}$ | $Al_{10}(OH)_{22}^{8+}$ | $Al_{16}(OH)_{38}^{10+}$ | $Al_{24}(OH)_{60}^{12+}$ |
| OH/Al ratio | 3.0 0 | 2.0 1.0 | 1.67 1.33 | 1.0 2.0 | 1.0 2.0 | 0.80 2.20 | 0.63 2.38 | 0.50 2.50 |

Fig. 2. Description of Al species with progressive polymerization.

Al 이온종은 띠고 있는 전하량이 다양하며, 이중에서 Al₁₃이 가장 우수한 응집 능력을 가지고 있으며, 대개의 이온종의 생명이 2초 이내인데 반하여 수 십분 이상일 정도로 뛰어난 특성을 가지고 있다. 또한 pH 8 ~ 10 범위에서도 응집능력을 갖고 있으므로 응집제중에 이런 화학종이 많으면 응집 효율의 증가뿐만 아니라 침전속도, 슬러지 생산량도 감소하는 장점이 있다. 물속에서 Al 이온들이 성장하는 구체적 과정과 구조를 Fig. 2에 나타내었다. 어떤 Al 이온들이 생성되는냐는 pH가 큰 영향변수 중의 하나이다. 어떠한 경우든 Al 화학종의 생성은 pH와 수온, 알칼리도 등의 변수에 따라 달라진다.^{8-13^{19,20}}

(2) 혼화장치



Fig. 3. Inline mixer element.

응집장치로 사용된 Inline mixer는 관내에 여러개의 Element가 좌우에 연속으로 고정되어 층류의 유체를 난류유체로 변환시켜 주면서 통과 중에 연속적인 교반(Mixing)을 일으켜 효과적으로 2가지 이상 유체를 혼합시켜주는 장치로 유체 흐름을 분할시키고 흐름의 방향을 뒤바꾸어주고 전환시키면서 분할, 방향전환, 뒤섞임의 3가지 역할이 배관내에서 연속적으로 이루어져 세밀한 Mixing까지 할 수 있는 기기이다.

Inline mixer는

- 교반공정의 단축과 단순화, 연속화 등 공정관리가 용이하다.
- 저점도는 물론 고점도의 유체 물질에도 적합하며,
- 운전 중 소음, 진동이 없다.
- 기계적인 교반장치에 비해 고장 요소가 전혀없어 반영구적이다.
- 유체와 유체, 유체와 기체, 분말의 혼합, 기체와 기체의 Mixing에 적합하다.
- Element의 형태가 곡선형으로 관내저항(Pressure Drop)을 극소화시켰으며,
- 배관 중에 어떠한 위치에도 설치가 용이하다(수직,수평).

등의 특징이 있다.

2) 여과이론 및 PCF의 특성

(1) 여과이론

여과는 수처리에서 고형입자를 제거하는 단위공정으로 광범위하게 사용되고, 물이 여재 사이를 통과하면서 입자물질이 여재 표면 위에 억류되거나 여재내부에 부착 제거되는 방법이다. 이러한 여과공정은 원수, 입자물질, 여재의 물리·화학적 작용 및 수리화학적 운전조건 등 많은 요인이 매우 복잡하게 반응함과 동시에 공극 내에서 floc 형성이나 유체의 전단력에 의해 이미 억류되었던 탁질의 탈리 등 2차적인 현상도 포함하고 있다. 여과에 의해서 제거 가능한 물질은 조류, 미세한 진흙입자, 콜로이드성 휴믹물질, 바이러스 등을 포함한 입자들이다.

여과공정에서 고형입자가 제거되는 기작은 전달, 부착, 역세에 의한 탈착 등에 의해 지배된다. 입자는 자신보다 100에서 1,000배 이상 더 큰 여재의 공극을 통해 이동하므로 입자가 제거되기 위해서는 유선을 가로질러 전달되어야 하고 수집체에 매우 가까이 접근하여야 한다. 이러한 전달과 부착기전을 Fig. 4 ~ 5에 나타내었다.²¹⁾

수중의 입자가 여재의 공극률보다 클 때는 체거름(Straining)작용을 하는 반면, 여재 공극보다 작은 입자 제거시에는 유체의 흐름으로부터 입자를 여재표면으로 운송(Transport)시켜야 하며, 입자와 여재사이의 척력이 최소가 될 때 입자는 여

재의 표면에 부착하게 된다.

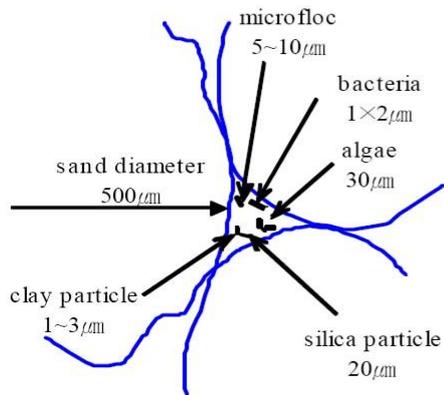


Fig. 4. Pore of media and floc removal in sand filter.

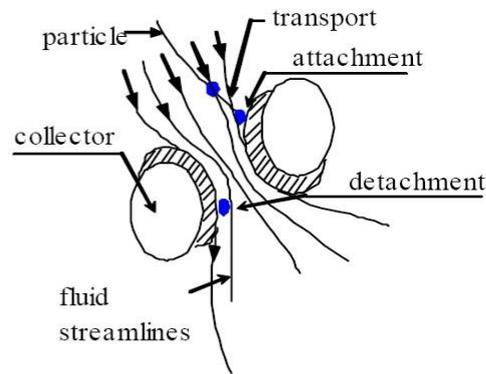


Fig. 5. Mechanism of filtration.

가. 체거름(Straining)

체거름이란 여재와 여재사이 공극에서의 부착현상으로 대부분 여층 표면에서 일어난다. 여층 사이에 운반되어 온 현탁입자와 여층 간격과의 단순한 대소관계에 의한 물리적인 거름작용으로 초기에는 여과공극보다 큰 입자만 억류되지만 여과가 진행되면서 표면에 억류된 탁질에 작은 입자들이 퇴적한다. 즉 현탁입자를 여층의 협소부분으로 운반하는 과정이 운송이며, 그 후 부착단계로 체거름이 작용한다고 할 수 있다.

나. 운송(Transport)

운송은 입자와 여재 사이에서 발생하는 충돌에 의한 기작이다. 차단, 침강, 확산을 포함하며 이러한 기작을 이해하기 위해서 모래입자(grains)와 같은 물 흐름을 방해하는 것을 고려해야 한다.

· 차단(Interception)

물 흐름에 따라서 유하하고 있는 입자가 여재의 존재에 따라 수류가 느려지고, 그 흐름을 따라 여재표면까지 수송하는 것이 차단작용이다. 입자가 여재 공극사이를 유동할 경우 유선결합과 분산을 반복하여 여재표면까지 수송할 기회가 많

아진다. 따라서 입자의 크기가 증가할수록 여재표면에 접촉할 기회도 증가할 것이다.

· 침강(Sedimentation)

여재를 통과한 미세물질은 여재의 공극사이를 천천히 유하하며, 공극 내에서의 침전작용과 여재표면에서의 부착으로 여층내에 억류된다. 그러나 floc이 형성되지 않고, 침전된 floc에 부착도 되지 않은 미립자는 여재 하부까지 유출된다. 침강이란 중력침강(gravitational sedimentation)으로, 유체인 물보다 입자의 밀도가 크다면, 입자는 작아도 중력침강을 할 수 있으므로, 흐름과 중력침강 방향의 합력 방향에 입자가 유동하게 된다.

· 확산(Diffusion)

콜로이드와 같은 미세입자가 열운동에 의해서 불규칙적으로 운동하는 것으로, 입자사이의 속도가 감소할수록 그리고 온도는 올라갈수록 더 많은 열에너지가 제공되어 충돌횟수가 증가한다. 브라운 운동은 큰 입자의 운동보다 작은 입자의 운동이 활발하므로, 직경이 작은 입자가 접촉할 기회가 크다고 할 수 있어 1 μm 보다 작은 입자제거에 있어 중요하다. 여재의 공극보다도 작은 세균이나 미세floc이 여재간극에 억류되는 것은 여재의 표면까지 간극수로를 통하여 이동해서 대부분 여재표면에 부착된다고 하는 2단계의 과정을 생각하여야 한다. 여과 제거기 작으로써 입자크기에 따른 확산, 침전, 차단은 Table 1과 같다.

Table 1. Diffusion, sedimentation, Interception by particle size

| Mechanism | Particle size | Content |
|--------------------------------|-------------------|---|
| Diffusion | < 1 μm | Removal efficiency is improved as decrease of particle size |
| Sedimentation and Interception | > 1 μm | Removal efficiency is improved as increase of particle size |
| | = 1 μm | Minimum removal efficiency |

다. 부착(Attachment)

부착은 여재 상부에 머물러 있거나, 여재사이의 공극부에 끼여 여층내부에 현탁 입자가 계속 유지되어 있는 상태이다. 따라서 부착력보다 큰 힘이 작용하면, 여재의 상부나 여층내로 이동할 가능성이 있다. 이러한 작용은 여재크기나 형상, 여층의 두께 및 현탁입자의 크기, 그리고 여과속도와 관련되어 있다.²²⁾

일반적으로 여과수는 초기에 약간의 탁질누출을 보이고, 이후 여과층이 성숙되면서 장시간에 걸쳐 탁도가 아주 낮은 깨끗한 여과수를 생산한다. 여층 내의 역류가 진행되면 상층부로부터 순차적으로 역류능력이 소실되며, 어느 시점에서는 여층 하부로부터 탁도 유출이 증가되기 시작한다. 이것이 여상의 파과(breakthrough) 현상이다.

역세 직후 여과초기에는 여과수의 탁도가 유입수의 탁도보다 높은 현상이 발생할 수 있는데 이러한 현상은 여과말기에 발생하는 탁질 누출현상과 분리하여 초기 탁질 누출현상이라고 말하며, 여기에는 두 가지 원인이 있다. 그중 하나는 역세 후 역세 배관 및 여상에 남아있는 역세수에 포함된 잔류 탁질이 여과가 시작되면서 여과수내에 포함되기 때문에 발생하는 것이고, 다른 하나는 여재가 여과능력을 가지기 위한 숙성단계에 있는 경우에 유입된 탁질을 충분히 제거시키지 못하고 유출시키기 때문이다.

· 여과숙성단계(Filter ripening stage)

역세 직후에 여과효율이 가장 높아지는 단계까지를 말하며 탁질에 대한 부착능력이 시간이 지날수록 증가하는 시기이다.

· 유효여과단계(Effective filtration stage)

여과숙성단계에서 탁질누출이 시작되기 전까지의 단계이며, 탁질 부착능력이 최고조에서 서서히 감소하는 경향을 보인다. 탈착이 점차 증가하기 때문에 여과수에서 탁도의 상승이 나타난다.

· 탁질누출단계(Turbidity breakthrough stage)

탁질이 누출되는 시점부터 여상에 수로가 발생하는 시점까지이며, 탁질은 여과에 따른 공극의 감소로 인한 여과속도의 증가로 떨어지며, 탈착 현상이 커짐에 따라 탁질 누출은 감소된다. 여과수 탁도는 여과 기능이 저하됨에 따라 유입수 탁도의 영향을 크게 받는다.

· 수로형성단계(Wormhole stage)

여상 내 대부분의 공극이 탁질의 누출로 막히게 되면, 부분적으로 몇 개의 수로를 통하여 물이 흐르게 된다. 공극 내의 빠른 여과속도로 인하여 부착은 일어나지 않으며, 이때 여과수의 탁도는 유입수의 탁도와 같게 된다.²¹⁾

(2) 섬유사여과기(Pore Control Fiber Filter, 이하 PCF)

섬유사여과기인 PCF는 여재인 섬유사 다발을 여과기 내부의 다공관 주위에 설치하여 회전기구로 비틀어 압착, 공극을 작게 한 후 유입수를 통과시켜 여과하고, 설정압에 도달하면 압착된 여재를 이완, 공극을 크게 하여 공기방울과 가압수로 역세하는, 여과와 역세의 반복으로 부유물질을 제거하는 기술이다. 보통 모래여과기와 같은 입상여재는 입경분포 및 형상에 따라서 공극율과 공극의 크기 등이 결정되며, 여재의 사용량에 따라 여층의 깊이도 결정된다. 그러나 PCF의 경우는 여재로 사용한 섬유사는 외부에서 작용하는 압력의 정도에 따라 섬유사와 섬유사 사이의 공간(공극)의 크기가 달라진다.

여과과정 중에는 여재가 압착되고, 역세과정 중에 있을 때에는 여재가 압착과 이완을 반복하도록 장치되어 있으며, 여재를 압착하거나 이완하는 방법과 원리는 다음과 같다. 먼저 섬유다발의 양 끝에 금속성 와셔를 부착하여 일정한 거리를 두고 마주보는 방사상의 상하 여재결대에 상기의 와셔를 끼워 여재가 상하 여재결대 사이에 늘어서도록 설치한다. 이때 상층의 상부여재결대는 회전운동이 가능하도록 하여 상부 여재결대를 회전시키면 결대에 걸려있는 섬유다발은 인장력을 받아 늘어남과 동시에 중앙의 다공관에 휘감기면서 모여든다. 따라서 느슨하게 늘어서 있던 섬유다발이 중앙으로 압착되어 공극의 크기가 작아지고, 반대로 상부 여재결대를 원래의 위치로 역회전시키면 섬유는 다시 이완되어 공극의 크기

가 커진다. 상부 여재결대의 회전에 따른 여과시와 역세시의 공급 모식도를 Fig. 6에 나타내었다.

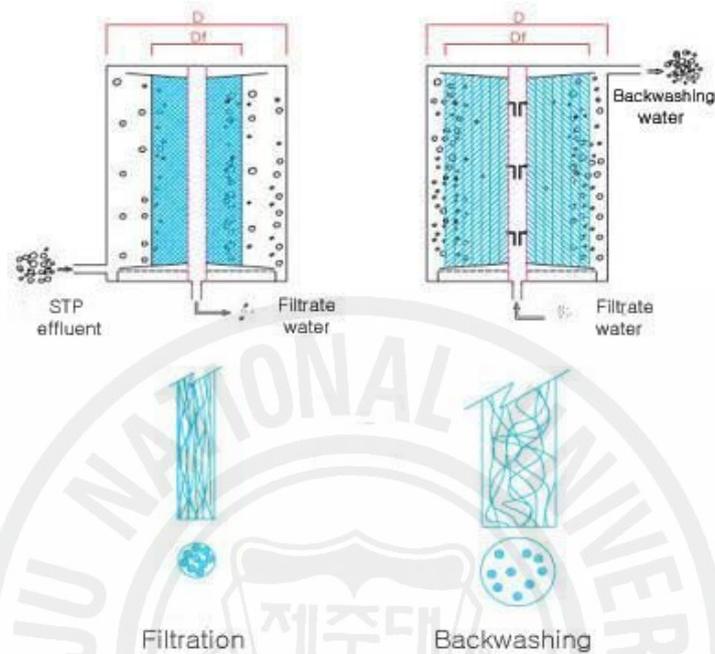


Fig. 6. Schematics diagram of filtration and backwashing.

역세공정은 여층을 이완시킨 상태에서 세척수를 유입시켜 여층 및 여과기 내의 잔류 입자를 상부의 역세배관을 통하여 배출하는 공정으로, 여층에 억류되어 있는 입자를 털어내는 세척동작, 여재의 헹굼, 그리고 직접 여과공정으로 전환했을 때 불안정한 초기 여과수를 원수조로 회송하는 린스조작으로 구분한다. 세척동작은 세척수와 공기를 공급하면서 여층의 이완과 비틀림을 반복하고 역세배수는 상부 역세드레인 배관으로 배출하며, 린스동작은 여층을 이완시킨 상태에서 세척수를 유입시켜 여층 및 여과기 내의 잔류 입자를 상부 역세드레인 배관으로 배출한다. 린스조작은 여과동작과 같으나 처리수를 원수조로 회송한다.

본 연구에 전처리장치로 사용된 섬유사여과기에 대한 연구로 정²³⁾은 정수처리 전처리 공정으로 사용 가능한 섬유사 여과기를 개발하기 위하여 여과기의 성능향상을 위해 여과속도와 여과수의 수질에 적당한 응집제의 종류와 주입량을 결

정하고, 이를 통해 얻어진 섬유사 여과기의 최적운전 조건을 결정하였다. 차²⁴⁾는 주요 운전 및 설계변수가 여과 성능에 미치는 영향에 대하여 정량화함으로써, 여과기를 설계할 때 사전에 여과 성능을 예측할 수 있는 기초자료를 제시하였다. 이²⁵⁾는 응집제 주입에 따른 처리효율과 여과효율, 여과 지속시간, ripening 기간의 정도 그리고 여과기에서 가장 중요한 요소로 인식되고 있는 역세척에 관한 연구를 수행하고, 소규모 정수처리 공정의 대체 가능성을 보았다. 안 등¹⁶⁾은 하수 방류수 중의 부유물질을 제거하기 위하여 Pilot Plant를 설치하고 제거효율과 시설의 유지관리비를 평가하였다.

섬유사여과기를 사용시 얻을 수 있는 장점으로는

- 심층여과로 고효율 여과가 가능하다.
- 비직조 유동여층의 고효율 격렬 유동역세가 가능하여 염류부착과 생물막 증식이 방지되어 정기적 산체척이 불필요하다.
- 다른 시설에 비하여 설치면적이 많이 필요하다.
- 여과속도가 높다
- 소량의 응집제를 사용하여도 높은 제거효율을 얻을 수 있다.
- 역세수량이 전체수량의 5% 전후이다.
- 자동조작이 가능하여 운영이 편리하다. 등이다.

3) 역삼투막의 특성

역삼투막은 유체내의 분자량이 100보다 큰 유기물질 뿐만 아니라 용해성염인 무기물질의 95 ~ 98%까지 처리한다. 응용분야는 해수담수화(Desalination)로부터 반도체의 초순수제조 및 폐수 재이용, 핵발전소의 보일러 등의 급수용, 의약품 등의 다방면에서 적용되어 사용되고 있다. RO의 원리는 용매는 통과시키지만 용질은 통과하지 않는 반투막 성질을 이용한 처리시설로 Fig. 7과 같다. 용매는 자유롭게 통과하지만 용질은 통과하지 않는 반투막에 의해서 2개의 실로 나뉜 용기의 A에는 염류용액을, B에는 물을 넣으면 B의 물 일부가 A의 용액으로 침투하여 평행에 달한다. 이때 A, B 사이에 압력차가 발생하여 Fig. 8의 I의 상태로 된다. 이 압력차를 삼투압이라고 하며, 이 삼투압에 견딜 수 있는 만큼의 외

압을 농후용액측에 가하면 Fig. 8의 II와 같이 역으로 용액 중의 용매가 수축으로 이동한다. 이 현상을 역삼투라고 한다.

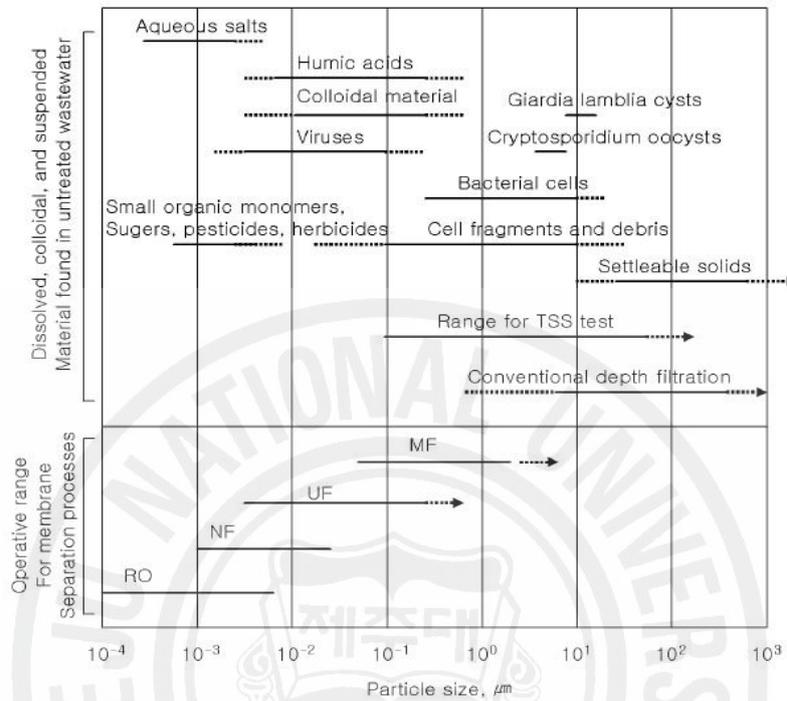


Fig. 7. Comparison of the size of the constituents found in wastewater and the operating size ranges for membrane technologies.

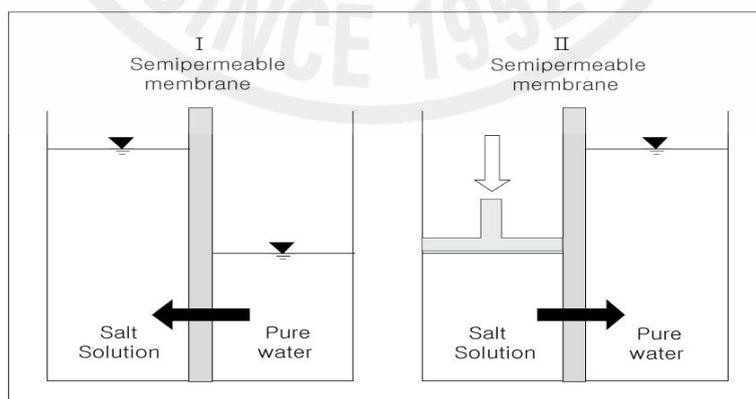


Fig. 8. Mechanism of reverse osmosis.

이것을 이용하여 용액에서 용매를 분리하는 방법이 역삼투법이다. 삼투압과 농도와의 관계에는 다음 식이 성립한다.

$$\pi = \Delta CRT$$

π : 삼투압(Pa)

ΔC : 농도차(mol/m³)

R : 기체상수 = 8.314(J/mol/K)

T : 절대온도(K)

막에는 막 자체만으로 구성된 것, 얇은 막과 그것을 지지하는 다공층이 하나로 되어 있는 비대상막, 얇은 막과 지지막을 별도로 만들어 조합시킨 복합막이 있다. 복합막은 얇은 막과 지지막의 조합을 자유롭게 할 수 있기 때문에 최근 개발이 이 방향으로 진행되고 있다. 이러한 투과막을 공업적으로 이용 가능하도록 한 장치를 모듈이라 한다.

본 연구에서는 나권형 모듈(Spiral module)을 사용하였는데 막과 막지지체, 스페이서, 투과액 채수관 등으로 이루어진다. 2장의 평막 사이에 통수성 지지물질을 끼워 넣고, 막의 외측 면에는 망상의 스페이서를 겹치고 막의 세면을 접착제로 봉하여 투과액 채수관을 중심으로 말아 넣은 것이다. 원수는 스페이서부에 들어가고, 막을 통과한 액은 지지체부에서 투과액 채수관을 통하여 배출된다.

나권형 모듈은 모듈당 막면적이 크고 투과속도도 빠르기 때문에 장치의 콤팩트화가 가능하다. 스페이서는 활류촉진효과를 갖고 있기 때문에 막으로의 공급량이 적어도 막면에서의 유속이 커지고 염분이 막표면 부근에 농축되어 염분제거율이 저하되는 농도분극현상을 방지할 수 있다. 따라서, 소비동력이 적게 드는 에너지 절약형이다. 반면 유로단면이 작기 때문에 유로폐쇄를 방지하기 위한 전처리를 필요로 한다.

RO공정의 적용 가능성은 분리막 오염에 따른 투과율감소에 큰 영향을 받는다. 투과율의 감소는 주로 막재질의 변질 및 원폐수의 수질변화, 막표면에서의 농도

분극현상 및 Membrane fouling에 기인한다. Fouling의 원인으로는 물리·화학적 인자 및 공정상의 인자로 구분이 가능하며, 우선 물리화학적 인자로는 단백질, 염(Salt), pH, 지방(Lipid), 미생물 등이 있고, 공정상의 인자로는 온도, 운전압력, Flowrate, Turbulence, Feed 농도 등이 있다. 투과율이 감소하면 막세척을 실시하는데 일반적인 세척방법으로는 일반증류수나 공정상에서 나온 투과수를 사용하여 낮은 압력과 높은 Flowrate로 Flushing 하여 세척하거나 특수한 경우는 산을 이용한 산세척, 효소를 사용한 세척 및 Sponge Ball 방법 등을 사용한다. 이에 따라 전처리공정은 전체 분리막공정의 안전 및 Flux의 감소를 줄일 수 있는 중요한 수단이며, 분리막공정의 안정적인 운영을 위해 매우 중요하다. 일반적으로 전처리를 통하여 SDI₁₅를 5미만으로 낮추거나 pH조정으로 공정중 염의 침전에 의한 Fouling을 최소화한다. 막의 재질에 따라서 잔류염소성분을 제거하여야 하며 미생물 번식에 따른 투과율 감소도 중요하므로 적절한 처리가 요구된다.²⁶⁾

3. 경제성분석

경제성 평가는 크게 설비비와 유지관리비 두 가지로 구분할 수 있다. 설비비는 초기투자비용으로 볼 수 있으며 건설비, 기계비, 전기 배선비 등이 포함된다. 유지관리비는 운영비로 인건비, 전력비, 감가상각비 등이 있다. 이러한 여러 인자 중 설비비 및 인건비, 감가상각비 등은 규모 및 장소에 따라 큰 차이를 보일 수 있다.

경제성분석을 하기 위해서는 최소 6개월 이상의 운전이 필요하다 판단되어 경제성분석에 대한 것은 기존의 연구결과를 비교 분석하였다. 2003년도 제주지역 하수처리장 방류수 재이용 방안 연구 보고서(1)¹⁴⁾에 의하면 Back-Washable Micro Filter(BMF)-RO공정으로 운전한 결과 m³당 생산원가는(50,000m³/d 기준) 285.5원으로, 인천 가좌하수처리장 방류수를 12,000m³/d 재처리하여 공업용수로 이용하고 있는 (주)INI 스틸사의 실제 운영비용 305원/m³ 과 비교할 때 큰 차이가 없지만, 처리용량이 작은 농촌지역의 하수처리장에 적용하면 그 생산단가는 대폭 증가할 것이다. 이것은 1일 2,000m³을 재처리하는 경우에는 m³당 생산원가

가 689원인데 반하여 1일 5,000m³으로 용량을 증가시키면 생산원가는 539원으로 낮아지고, 1일 100,000m³을 재처리하면 생산원가는 269.3원으로 하락하는 규모의 경제(economy of scale)가 존재하기 때문이다. m³/day 당 운전비용을 산정한 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Reuse plant operating cost in sewage effluent scale¹⁴⁾

(unit : won)

| Item | Capacity(m ³ /day) | | | | | |
|----------------------|-------------------------------|-------|-------|--------|--------|---------|
| | 2,000 | 3,000 | 5,000 | 10,000 | 50,000 | 100,000 |
| Total | 689 | 650 | 539 | 428 | 285.5 | 269.3 |
| Wage | - | - | - | 5 | 5.5 | 2.8 |
| Power Ratio cost | 81 | 81 | 81 | 81 | 89 | 89 |
| BMF Replacement cost | 210 | 210 | 144 | 90 | 30 | 25 |
| RO Replacement cost | 40 | 38 | 34 | 29 | 12.5 | 11.5 |
| chemicals cost | 25 | 25 | 21 | 19 | 19 | 15 |
| Depreciation rate | 333 | 296 | 259 | 204 | 129.5 | 126 |

Table 2을 보면 1일 2,000m³을 기준으로 할 때 감가상각비를 제외한 항목 중 가장 높은 비율을 차지하는 것은 BMF 막 교체비용으로 전체의 30%수준으로 매우 높음을 알 수 있다. BMF막 교체비용과 섬유사여과기의 유지관리비를 비교해보면 환경관리공단²⁷⁾은 섬유사여과기(PCF)는 3.5년 이상 안정적으로 사용 가능하고, 1일 120m³의 하수처리장 방류수 또는 폭기조 혼합수를 유입원수로 사용하였을 경우 연간 전력사용량 및 여재 교체비용의 유지관리비는 m³당 처리비용은 8.34원/m³으로 조사하였다. 안 등¹⁶⁾은 4,000m³/day 규모의 Pilot Plant를 4개월간 연속 운전한 결과 전력사용량, 여재 교체비용을 포함한 유지관리비를 1.33원을 산정하였다.

이로써 섬유사여과기는 유지관리 측면에서 막분리시설보다 우위에 있음을 알 수 있다.

III 실험장치 및 방법

1. 실험장치

본 연구에 사용되어진 2단 PCF/RO 모식도를 Fig. 9에 나타내었다.

유입원수는 S하수처리장 방류수의 일부를 사용하였고, 원수는 급속혼화장치인 Inline-mixer와 응집조를 거친 후, 1차 PCF와 2차 PCF에서 여과된 후 최종적으로 RO에 유입하게 된다. Inline-mixer와 응집조 사이에는 수동밸브가 설치되어 있어 유량과 물의 흐름을 조절할 수 있게 되어 있다.

Inline-mixer는 직경 32 mm, 길이 1,000 mm로 구성되어 있으며, 응집제의 주입은 Inline-mixer 앞 직선 형태의 유입관에 정량펌프를 이용하여 직접 주입하였다.

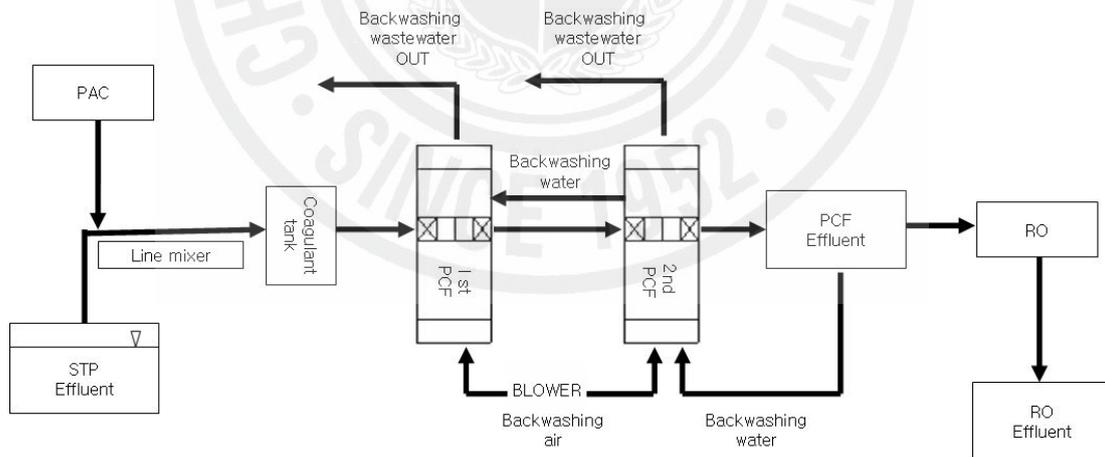


Fig. 9. Schematic diagram of pilot plant.

RO 전처리 장치인 2단 PCF는 안정적인 수질 확보를 위하여 기존의 섬유사여과기 후단에 1단을 더한 형태로 제작하였다. 내부 직경은 400 mm, 높이는 1,060

mm의 크기이고, 섬유사 재질은 polypropylene 계열의 micro fiber, 여과흐름은 수평흐름방향이다. 역세공정은 설정압력 0.8 kgf/cm²이 되면 압력스위치 신호에 의해 역세공정이 시작되며, 총 3개의 공정으로 나뉜다. 역세 1공정(2분)은 역세공기 및 역세수를 동시에 공급하여 포획된 SS를 섬유사로부터 탈리시켜 여과기 외부로 배출시키고, 역세 2공정(30초)은 역세수만 공급하여 탈리된 부유물질을 배출시켰다. 역세 3공정(30초)은 역세 1, 2 공정 완료후 여과기내부(스트레이너)에 잔존할 수 있는 부유물질을 스트레이너 드레인쪽으로 배출하여 초기의 수질을 확보하였다. 배출수는 상부 역세드레인 배관으로 배출되고, 여과와 역세공정은 자동 실시하도록 구성되었다. 역세수는 처리수를 이용하였다.

RO는 필름텍 제품으로 나권형의 모듈과 재질은 PA(Polyamide)로 구성되어 있으며, 운전은 회수율 75%를 유지하기 위해 유입유량은 2.0 m³/hr, 유출유량은 1.5 m³/hr을 유지하였고, 20 kgf/cm² 압력 이상이 되면 세정을 위하여 자동 정지하도록 하였다.

본 연구에 사용된 PAC는 Alum의 성능을 보완하기 위해 alum을 고분자화 시킨 것으로 비록 고가이지만 저온 및 고탁도에서 응집성이 좋고 응집 보조제가 필요하지 않은 응집제로 알려져 있다. 현재는 정수장에서 alum을 대체하여 가장 많이 사용하고 있다. alum에 비하여 응집 및 floc형성 속도가 빠르고 floc의 크기가 커서 침강속도가 빠르며, 적정 주입율이 넓으므로 과량 주입에 의한 역효과가 적어 작업의 안정성이 좋은 응집제이다. 또한 Alkalinity의 저하가 alum의 1/2수준이다. 하지만 장기간 보관시 응집능력이 저하되고 물에 용해시키면 가수분해를 촉진하여 성능이 저하되는 단점을 가지고 있다.²³⁾

2. 분석항목 및 방법

2007년 10월 ~ 2007년 12월의 연구기간 동안 여과 지속시간에 따른 공정의 압력 변화를 관찰하기 위하여 섬유사여과기(PCF) 각 단의 유입구 부분에 압력계를 설치하였고, PCF 유입수와 처리수의 유량과 탁도, RO유입수와 처리수의 유량과 E.C는 1분 간격으로 컴퓨터에 저장하여 분석하였다.

Table 3. Analytical methods of water quality

| Item | Unit | Analytical Methods | Item | Unit | Analytical Methods |
|-----------------|------|--------------------------------------|-------------------|------------------|---|
| pH | - | pH meter (S20 SevenEasy™) | T-P | mg/L | Spectrophotometer (HP 8453) |
| SS | mg/L | Glass Filter Apparatus | UV ₂₅₄ | cm ⁻¹ | Spectrophotometer (HP 8453) |
| COD | mg/L | 100°C KMnO ₄ Method | Conductivity | mS/cm | Conductivitymeter (YSI - 6920, Signet 8850-1) |
| Turbidity | NTU | Turbidimeter (HACH 2100P, Micro TOL) | SDI ₁₅ | - | SDI ₁₅ Method ^{29,30)} |
| Cl ⁻ | mg/L | Mohr Method | Alkalinity | mg/L | Titration method |
| T-N | mg/L | Spectrophotometer (HP 8453) | | | |

유량의 측정은 전자유량계(WTM1200, Win TEC, Korea), 탁도는 On-line Turbidimeter(Micro TOL, HF scientific, USA). E.C는 Conductivity meter(Signet 8850-1, George Fischer Signet, USA)를 이용하여 측정하였다.

시료의 채수는 원수는 Inline mixer 앞 유입구에서, 1차 PCF 처리수, 2차 PCF 처리수, RO 처리수에 대하여 2차 PCF 처리수의 탁도가 안정화되었을 때 실시하였다. 모든 분석 항목은 수질공정시험법과 Standard Methods에 의해 실시하였고 항목별 분석방법은 Table 3에 나타내었다. Fouling 유발물질에 대한 분석항목별 특성은 다음과 같다

1) Turbidity(NTU)

Turbidity는 물의 맑은 정도로 fouling 가능성을 나타낸다. Turbidity가 1이상이면 membrane fouling의 경향이 대단히 높다. 이 수치는 대체로 NTU(Nephelometric turbidity unit)로 표시하나 다른 상대적인 단위를 사용하기도 한다. SDI₁₅ 실험과 마찬가지로 Turbidity도 fouling에 대한 잠정적인 지표일

뿐만 Turbidity나 SDI₁₅가 RO의 원수 상태를 나타내는 완벽한 척도는 아니지만 매우 유용하며 전처리 설비의 성능을 잘 나타내는 척도가 된다.

2) UV₂₅₄(UV 254nm absorbance, cm⁻¹)

여러 유기탄소 화합물들이 수중에서 lignin, tannin, humic 물질 등의 형태로 존재한다. 이러한 유기탄소 화합물질은 200 ~ 400nm의 근자외선 영역에서 최대 흡광도를 나타내는데, 이것은 방향족 화합물질(aromatic substances), 불포화지방족 화합물질(unsaturated aliphatic compounds), 포화지방족 화합물(saturated aliphatic compounds)등 탄소고리가 이중결합 이상을 하고 있는 물질들이 빛을 흡수하는 것에 근거한다. 이러한 이유 때문에 UV-254nm 가 용존유기물질의 변화상태를 간접적으로 측정하는데 많이 이용되고 있다. 시료는 Type A/E Glass Fiber Filter(Gelman Science)를 사용하여 여과한 후 1cm 석영 cell을 사용하여 파장 254nm에서 spectrophotometer을 사용하여 측정하였다.²⁸⁾

3) SDI₁₅(Silt density index)

SDI₁₅는 Membrane에 Colloid 및 부유물질이 미치는 영향을 파악하기 위한 인자로서 하수재이용에 있어 처리효율을 나타내는 가장 중요한 Index이다. 측정방법은 MILLIPORE TYPE HA 0.45 μm의 여과지에 시험수를 2.1 kgf/cm²(30 psi)의 일정압력에서 통과시킬 때 초기 500 ml의 시험수가 여과되어 소요된 시간(T₀)과 같은 조건으로 15분간 계속해서 여과 후 500 ml를 여과하는데 소요되는 시간(T₁₅)을 구하여 다음과 같이 계산한다.

$$SDI_{15} = 100 \times (1 - (T_0/T_{15}))/15$$

SDI₁₅ 측정은 RO membrane에서 일어나는 것과 동일한 현상을 이용하는 것이 아니라는 한계가 있지만 SDI₁₅가 3이하면 fouling은 심하지 않으며 SDI₁₅가 5 이상일 경우 심한 fouling이 일어날 수 있다.^{29,30)}

IV 결과 및 고찰

1. 하수처리장 방류수의 수질특성

제주 S하수처리장 방류수 수질 자료는 2006 ~ 2007년 정기적으로 조사한 자료를 인용하였으며 내용은 Table. 4와 같다.

Table. 4 Characteristics of effluent from S Sewage Treatment Plant

| | | Flow m ³ /d | Temp °C | pH | BOD mg/l | COD mg/l | SS mg/l | T-N mg/l | T-P mg/l | E. Coli EA/ml | Cl ⁻ mg/l |
|--------------|------|---------------------------|------------|-----|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------------|-------------------------|
| 2006 year | Jan | 2,068 | 15.7 | 7.1 | 4.1 | 7.7 | 6.9 | 7.574 | 0.925 | 27 | 876 |
| | Feb | 2,076 | 15.5 | 7.1 | 4.0 | 7.4 | 7.8 | 8.339 | 0.971 | 22 | 423 |
| | Mar | 2,244 | 15.1 | 7.1 | 3.7 | 6.0 | 6.4 | 9.319 | 1.141 | 31 | 457 |
| | Apr | 2,806 | 16.3 | 7.3 | 3.7 | 6.4 | 7.0 | 8.897 | 1.379 | 38 | 286 |
| | May | 2,805 | 19.2 | 7.1 | 4.0 | 7.0 | 7.8 | 8.809 | 1.377 | 31 | 469 |
| | June | 3,009 | 21.2 | 7.0 | 4.6 | 7.0 | 7.7 | 9.049 | 1.614 | 46 | 419 |
| | July | 4,452 | 23.1 | 7.1 | 6.8 | 9.2 | 9.5 | 8.921 | 0.996 | 131 | 306 |
| | Aug | 3,624 | 25.0 | 7.1 | 3.4 | 6.6 | 8.7 | 9.398 | 1.653 | 34 | 410 |
| | Sep | 3,483 | 23.5 | 7.1 | 4.0 | 7.0 | 8.3 | 9.448 | 1.439 | 49 | 249 |
| | Oct | 2,519 | 21.2 | 7.1 | 2.9 | 5.3 | 6.8 | 8.967 | 1.432 | 39 | 831 |
| | Nov | 2,733 | 19.9 | 7.1 | 3.1 | 5.3 | 6.2 | 8.945 | 1.589 | 42 | 588 |
| | Dec | 2,645 | 18.8 | 7.1 | 2.5 | 4.7 | 5.6 | 8.860 | 1.572 | 44 | 534 |
| 2007 year | Jan | 2,928 | 15.6 | 7.1 | 3.4 | 6.2 | 8.0 | 9.685 | 1.609 | 56 | 1,190 |
| | Feb | 2,847 | 15.4 | 7.1 | 3.5 | 6.3 | 8.5 | 9.942 | 1.658 | 67 | 895 |
| | Mar | 3,168 | 16.0 | 7.1 | 3.9 | 6.3 | 9.2 | 9.585 | 1.619 | 85 | 953 |
| | Apr | 3,100 | 17.2 | 7.1 | 3.3 | 5.6 | 8.7 | 9.123 | 1.781 | 58 | 871 |
| | May | 2,718 | 21.2 | 7.2 | 2.8 | 4.5 | 9.5 | 18.924 | 1.952 | 63 | 478 |
| | June | 3,293 | 22.1 | 7.0 | 3.9 | 6.8 | 12.1 | 18.388 | 1.705 | 61 | 824 |

하수처리장 방류수를 재이용하고자 할 때 가장 우선적으로 결정해야 할 사항은 재이용 용도별 수질기준에 적합한지를 판단하는 것이다. 용도별 수질기준이 정해져야만 각 용도별 처리공정이 결정되고, 이 처리공정에 따라서 각 용도별 재이용의 경제성이 결정되기 때문이다. 방류수 수질분석 결과를 보면 평균적으로 방류수 발생량은 2,918 m³/day이고, 수온은 19 °C, pH는 7.1, BOD와 COD는 각각 3.8 mg/L와 6.4 mg/L를 보이고 있으며, SS는 8 mg/L를 보이고 있다. 이 기간중 Cl⁻농도는 249 ~ 1,190 mg/L로 4배의 편차를 보이고 있으나, 농도는 월별, 계절별 뚜렷한 상관성은 없었다. Cl⁻농도의 시간대별, 일별 변화를 다음과 같이 추정해 보았다.

1) Cl⁻농도와 E.C간의 상관성 및 Cl⁻농도의 추정

Cl⁻농도는 2007년 8월 20일 ~ 2007년 8월 21일, 2007년 9월 6일 ~ 2007년 9월 7일, 2007년 11월 16일 ~ 2007년 11월 17일 총3회에 걸쳐 24 hr 동안 1 hr 간격으로 방류수를 채수하고, 질산은 적정법으로 분석하였다. 방류수의 E.C의 측정에는 다항목 수질측정기(YSI-6920)를 이용하였으며 10분단위로 측정 기록하였다.

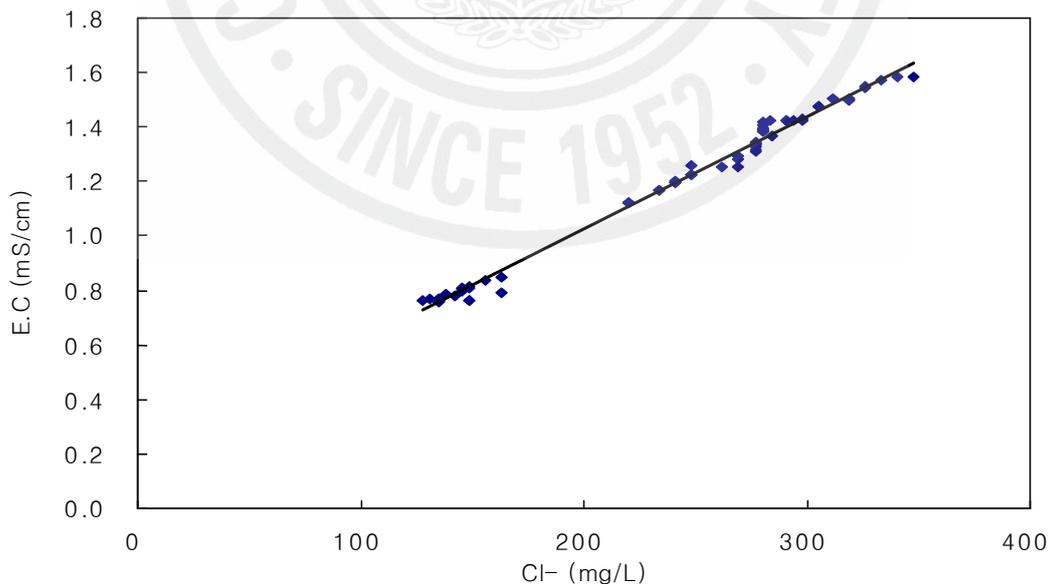


Fig. 10. Correlation between E.C and Cl⁻ Concentration.

상관성을 조사한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$Y = 0.0041X + 0.2011(R^2 = 0.9923)$$

이 결과를 근거로 Fig. 11와 같이 Cl^- 을 추정해 보았다.

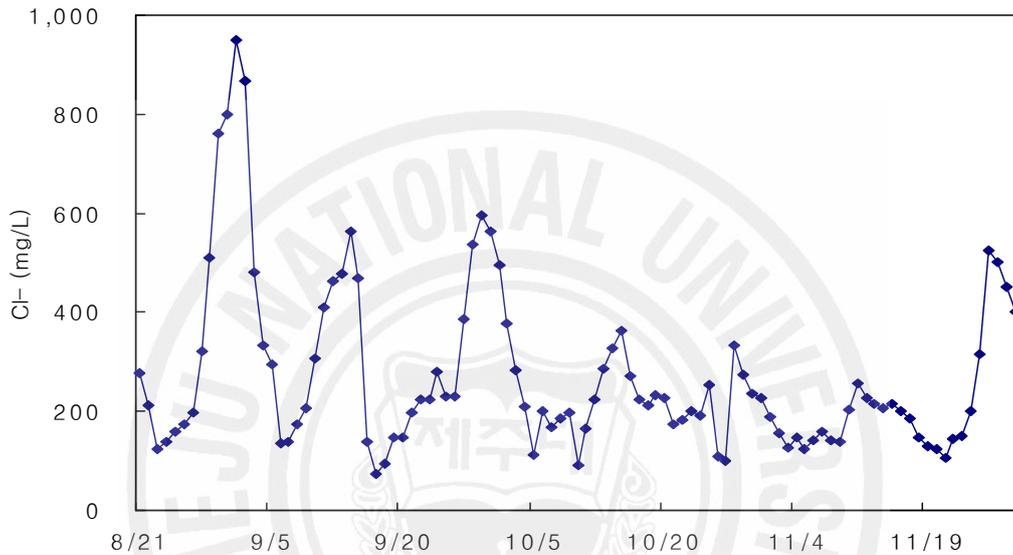


Fig. 11. Estimation of Cl^- Concentration.

추정된 Cl^- 은 Fig. 11에서와 같이 변동폭이 심하여 최저 73 mg/L, 최고 979 mg/L, 평균 270 mg/L의 농도를 보였다. 환경관리공단³⁴⁾에 의하면 해안지역에 위치한 하수처리장들 중 일부는 유입관로를 통하여 해수가 유입되고 있다고 보고하여 본 하수처리장의 고농도 Cl^- 은 해수의 유입관로에의 침입에 의한 영향으로 사료된다. Table. 5와 Fig. 11의 결과를 외국의 농업용수 수질기준³⁴⁾과 하수처리수 재이용수질 권고기준의 농업용수 권고기준³⁾과 비교해 보면 중금속과 미량물질을 제외한 유기물질과 부유물질의 경우 농업용수로서 재이용이 가능하지만 하수방류수의 직접적인 이용은 고농도의 Cl^- 으로 부적절한 것으로 판단된다. Cl^- 농도가 과다하면 식물체의 광합성률 감소, 탄수화물 이동저해, 호흡 및 수분흡수를 저해한다고 알려져 있다.¹¹⁾

응집-여과공정의 적용시 입자성물질이나 유기물이 다량 존재하게 되면 유지관 리측면에서 많은 응집제가 필요하게 되고 이것은 여과시간의 단축과 여과수량을 감소시킬 수 있는 요인이 되므로 여과공정의 적용이 어렵지만 본 하수처리장 방 류수의 수질은 연중 변동폭이 적고 SS의 농도가 낮아 응집-여과공정의 적용에 적합한 수질로 평가된다.

2. 최적 운전조건의 결정

RO의 Fouling방지를 위해서는 안정적인 수질이 요구되는데, 전처리장치로 도입된 섬유사여과기(PCF)를 콜로이드와 수 μm 의 입자성 물질로 이루어진 하수처리 장 방류수에 적용시 평균 5 μm 이하의 입자 크기는 제거가 불가능하여 fouling 방 지를 위해서는 응집제를 주입하여 여과하는 효율개선이 필수적이다. 이런 응집공 정을 여과공정의 전단계에 도입하면 입자의 크기가 증가하여 여과효율이 증가할 뿐만 아니라 입자가 쌓이더라도 응집·부착된 flocc이기에 물리적 세척에 의해 쉽 게 제거된다.

1) 혼화방식에 따른 처리효율

급속혼화 후 완속혼화의 필요성을 파악하기 위해 전기중화 후 응결과정이 생 략된 Inline mixer type(급속혼화, 체류시간 1초)과 전기중화 후 4분의 체류시간 을 갖는 Inline mixer-coagulant tank type(급속혼화+완속혼화)으로 구분하여 유 입유량을 2.5 m³/hr으로 유지하고 여과시간 30 min이 지난 후, SDI₁₅와 탁도를 이용하여 여과성 flocc의 적정처리여부를 확인하였다. 응집조에서는 기계적인 교반 은 없으며, 수류에 의해 혼합이 이루어진다. 그 결과를 Table 5와 Table 6에 나 타내었다.

콜로이드에 의한 막오염(fouling) 가능성을 예측하는 방법으로는 탁도와 SDI₁₅값 이 이용되며 주로 SDI₁₅값이 막의 오염을 예측하는 지수로 이용되고 있다.^{15,29,30)}

Table 5. Relation between PAC dosage and fouling index(Inline mixer type)

| | 0 ml/min | 4.5 ml/min | 9.0 ml/min | 13.5 ml/min | 18.0 ml/min | 22.5 ml/min |
|-------------------|----------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| SDI ₁₅ | 5.5 | 4.1 | 3.7 | 3.8 | 2.6 | 3.9 |
| Turb. | 1.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |

Table 5의 Inline mixer type의 경우 응집조를 설치하지 않아 공간적 여유를 확보할 수 있는 이점이 있으나, fouling 방지를 위한 여과성 flocc을 생성하려면 응집제 주입량이 많고, 적정주입량을 벗어나면 SDI₁₅값이 급격히 증가하여 경제성과 fouling 방지 측면에서 적절하지 못한 것으로 판단된다.

Table 6. Relation between PAC dosage and fouling index (Inline mixer-coagulant tank type)

| | 0 ml/min | 4.5 ml/min | 9.0 ml/min | 13.5 ml/min |
|-------------------|----------|------------|------------|-------------|
| SDI ₁₅ | 5.3 | 2.7 | 2.5 | 3.0 |
| Turb. | 0.7 | 0.2 | 0.1 | 0.1 |

반면 Table 6의 Inline mixer-coagulant tank type의 경우 소량의 응집제 주입으로도 PCF가 제거 가능한 여과성 flocc이 생성되었고, 4.5 ml/min와 13.5 ml/min의 경우에도 3.0이하의 값을 보여 유량의 변동에 따른 응집제 농도의 변동에도 안정적으로 처리될 것으로 보인다. 이러한 결과는 Inline mixer 후 펌프가 없어 flocc의 깨짐이 없고, 응집조를 거치면서 충돌에 의한 거대 flocc 형성이 주요인으로 사료된다. 이와 비슷한 연구결과로는 이²⁸⁾와 Stephenson³¹⁾, Glaser 등³²⁾이 있으며, 공통적으로 급속혼화 후 완속혼화를 주었을 때 여과시 수두손실이 낮게 나왔으며, 체류시간을 달리해도 모두 유사한 수두손실과 처리수의 수질을 얻었다. 이²⁸⁾는 긴 혼화시간이 주어지더라도 입자의 성장이 제한적으로 일어나기에 혼합시간에 따라 유사한 수두손실을 가지는 것으로 판단하였다.

Table 5와 Table 6의 결과에 비추어 경제성과 fouling 방지 측면에서 Inline mixer-Coagulant tank type이 적절하다 판단되어 다음과 같이 적정 응집제 투입량을 결정하였다.

2) 응집제 투입량 변화에 따른 수질특성

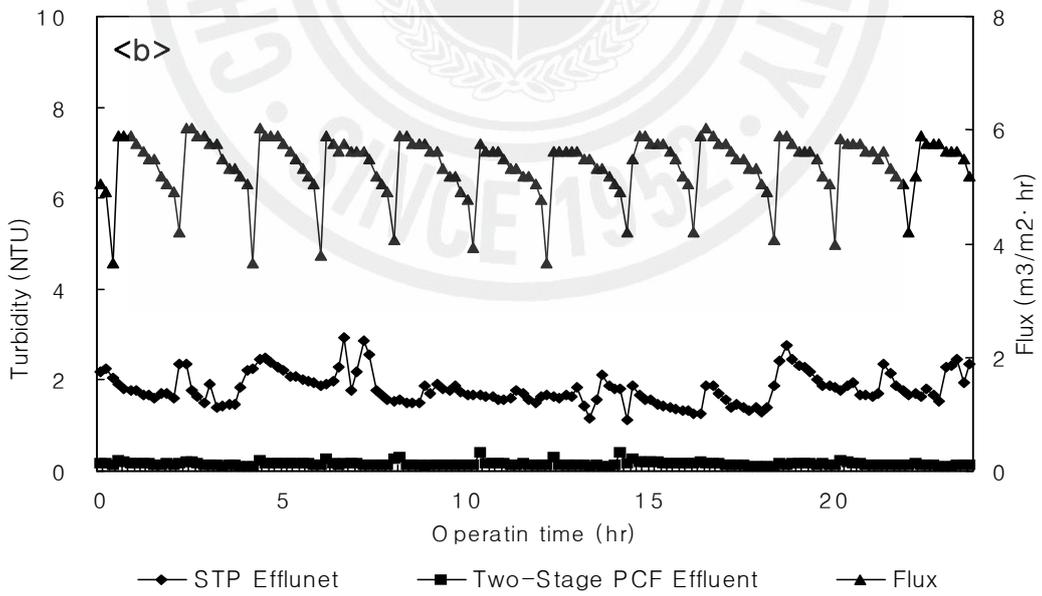
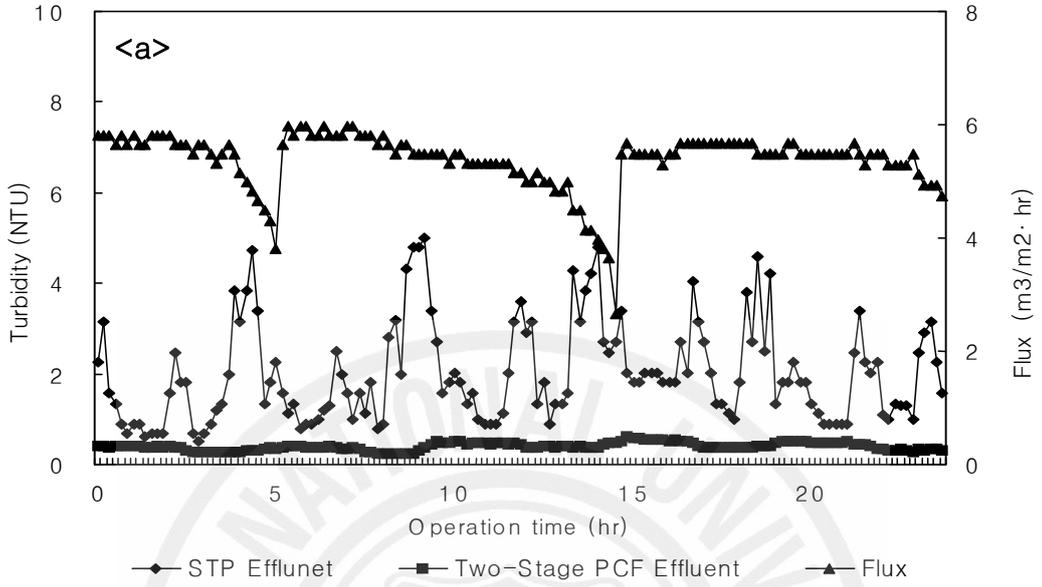
RO전처리장치로써 fouling 방지와 적정처리여부를 확인하기 위해서는 탁도와 Flux의 변화 그리고 수질분석결과를 고려해야 한다. Table 6의 결과를 참고하여 응집제를 4.5 ml/min, 9.0 ml/min, 13.5 ml/min(PAC(1.7% as Al₂O₃))씩 단계별로 투입후 PCF 유입유량 2.0 ~ 3.0 m³/hr(평균 2.5 m³/hr)을 유지하면서 48 hr 동안 운전하였다.

(1) 응집제 투입량별 탁도변화 및 운전결과

48 hr의 운전 중 24 hr의 PCF 유입수와 처리수의 시간에 따른 탁도와 Flux 변화를 10 min 산술평균하여 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12의 응집제를 투입하지 않은 <a>와 응집제를 투입한 , <c>, <d>를 비교해 보면 응집제를 투입한 경우가 처리수의 탁도가 매우 안정적으로 처리됨을 보여주고 있다. 처리수의 탁도는 응집제를 투입하지 않은 경우 평균 0.4 NTU를 보였고, 응집제를 투입한 경우 투입량에 관계없이 평균 0.2 NTU의 결과를 보였다. 응집제 투입량별 여과 지속시간과 Flux 흐름은 일정한 패턴을 보이고 있다.

Table 7. Operation results with coagulants dosage(24 hr)

| | Production (m ³ /24 hr) | Backwashing water (m ³) | Run time (min/1 Cycle, Ave) | Number of backwashing (Per day) | Effluent Turbidity |
|-------------|---------------------------------------|---|--------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| 0 ml/min | 75.9 | 0.4 | 508 | 2 | 0.3~0.6 (0.4) |
| 4.5 ml/min | 61.3 | 2.4 | 119 | 12 | 0.1~1.6 (0.2) |
| 9.0 ml/min | 55.2 | 3.4 | 83 | 17 | 0.1~2.0 (0.2) |
| 13.5 ml/min | 54.3 | 4.2 | 70 | 21 | 0.1~1.5 (0.2) |



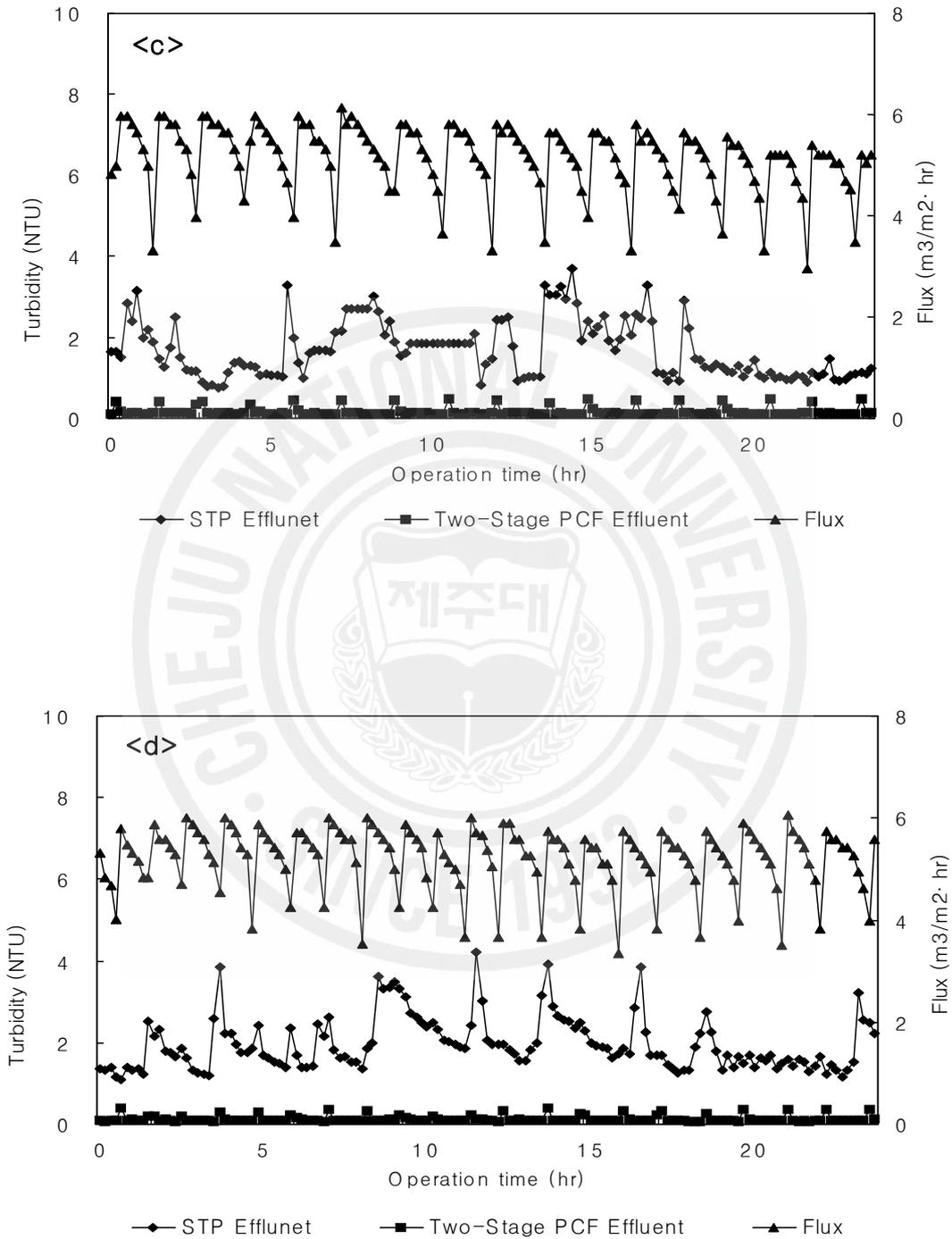


Fig. 12. The variation of turbidity and flux with PAC dosage.

(a : 0 ml/min, b : 4.5 ml/min, c : 9.0 ml/min, d : 13.5 ml/min)

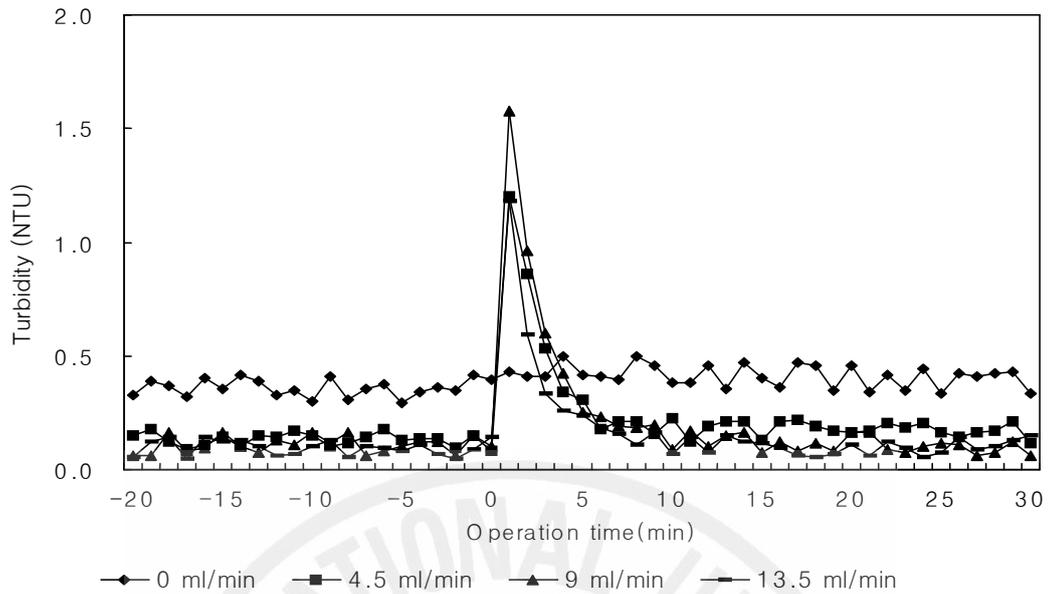


Fig. 13. The variation of turbidity with PAC dosage.

총 역세물량은 응집제 농도가 증가할수록 역세에 필요한 물량이 증가함을 알 수 있지만, 1일 처리물량에 비하여 각각 1%, 4%, 6%, 8% 수준을 보였다. 1일 처리물량은 응집제를 사용하지 않은 경우가 가장 많았고, 9.0 ml/min와 13.5 mg/L에서 각각 55.2 m³/day, 54.3 m³/day을 생산하여 응집제 양이 증가 할수록 생산량이 줄어들음을 알 수 있다.

Fig. 13에 응집제 주입량별 처리수 탁도를 역세시점을 중심으로 1 min 단위로 나타내었다. 0 ml/min의 경우 역세와 무관하게 일정한 변화를 보이고 있지만, 4.5 ml/min, 9 ml/min, 13.5 ml/min에서는 여과초기 탁도가 증가하였다. 이것은 2차 PCF 여재의 숙성단계 이전에 섬유사 외부와 내부에 존재하고 있던 재응집된 floc²⁰⁾과 여재에 붙어있던 floc들이 물의 흐름과 함께 유출되는 초기 탁질누출현상으로, 여과초기 처리수의 탁도 증가는 1회당 4 ~ 5분, 최대값은 2.0 NTU 수준이고, 여과가 진행됨에 따라 빠르게 회복되는 것을 볼 수 있다. 응집제 주입량 0 ml/min에서 탁도가 증가하지 않는 것은 원수중 입자의 크기가 PCF가 제거 불가능한 5 μm이하의 입자성 물질이 다량 포함되어 있고, 여과가 주로 1차 PCF에서 이루어졌기 때문에 역세후 탁도 증가현상은 없는 것으로 사료된다.

차¹⁷⁾와 정²³⁾의 결과에는 여과초기 뿐만 아니라 여과 말기 처리수의 탁도 증가(Breakthrough)를 볼 수 있었는데 본 연구에서는 이런 Breakthrough에 의한 탁도의 증가를 볼 수 없었다. 그 이유로 기존연구에 사용된 plant가 단단 형태였지만 본 연구에 사용된 plant는 2단 형태이기에 1단에서 유출된 입자들이 재응집되어 후단에 설치된 PCF에 여과, 부착된 것으로 사료된다.

(2) 응집제 주입량별 제거효율분석

Fig. 14 ~ 18는 응집제 주입량별 PCF 유입수, 1차 PCF 처리수, 2차 PCF 처리수의 pH, Cl⁻, SS, UV₂₅₄, T-N, T-P, SDI₁₅, COD, Alkalinity의 수질측정 결과와 제거효율을 나타내었다. 시료의 채수와 SDI₁₅의 측정은 응집제 주입후 6 hr이 지난 후 각각 3회와 4회 실시하였고, 결과는 산술평균 하였다.

Fig. 14은 응집제 주입량에 따른 pH와 Cl⁻의 농도를 나타낸 것으로, pH의 경우는 PAC의 적정 pH범위인 6 ~ 9을 만족하는 것을 보여주고 있고, 응집제 주입후에도 그 변화폭이 크지 않아 응집제 주입으로 pH의 감소는 없는 것으로 조사되었다. Cl⁻도 응집제 주입량에 따른 변화가 없어 응집제를 주입하더라도 PCF는 Cl⁻을 제거할 수 없음을 보여준다.

Fig. 15의 SS는 응집제 주입 여하에 관계없이 90% 이상의 높은 제거효율을 보여주고 있는데, 1차 PCF 처리수와 2차 PCF 처리수의 SS 농도를 비교해보면 1차 PCF에서 미처 제거하지 못한 미세 입자 혹은 미세 floc이 재응집되어 2차 PCF에서 제거한 것으로 판단된다.

용존 난분해성 유기물질의 지표로 활용되고 있는 UV₂₅₄의 측정결과를 보면 응집제를 주입하지 않은 경우 제거효율은 6.5%로 낮게 나타났지만, 응집제의 양이 증가할수록 제거효율이 증가하여 4.5 ml/min의 경우 24%로 나타나고 있고, 그 이상에서도 비슷한 제거효율을 보이고 있다. 응집제 주입에 따라 제거효율이 비슷하게 나타나는 것은 방류수 중에 응집에 의해 제거하기 어려운 non-humic 물질이 포함되어 있기 때문이다.²⁸⁾

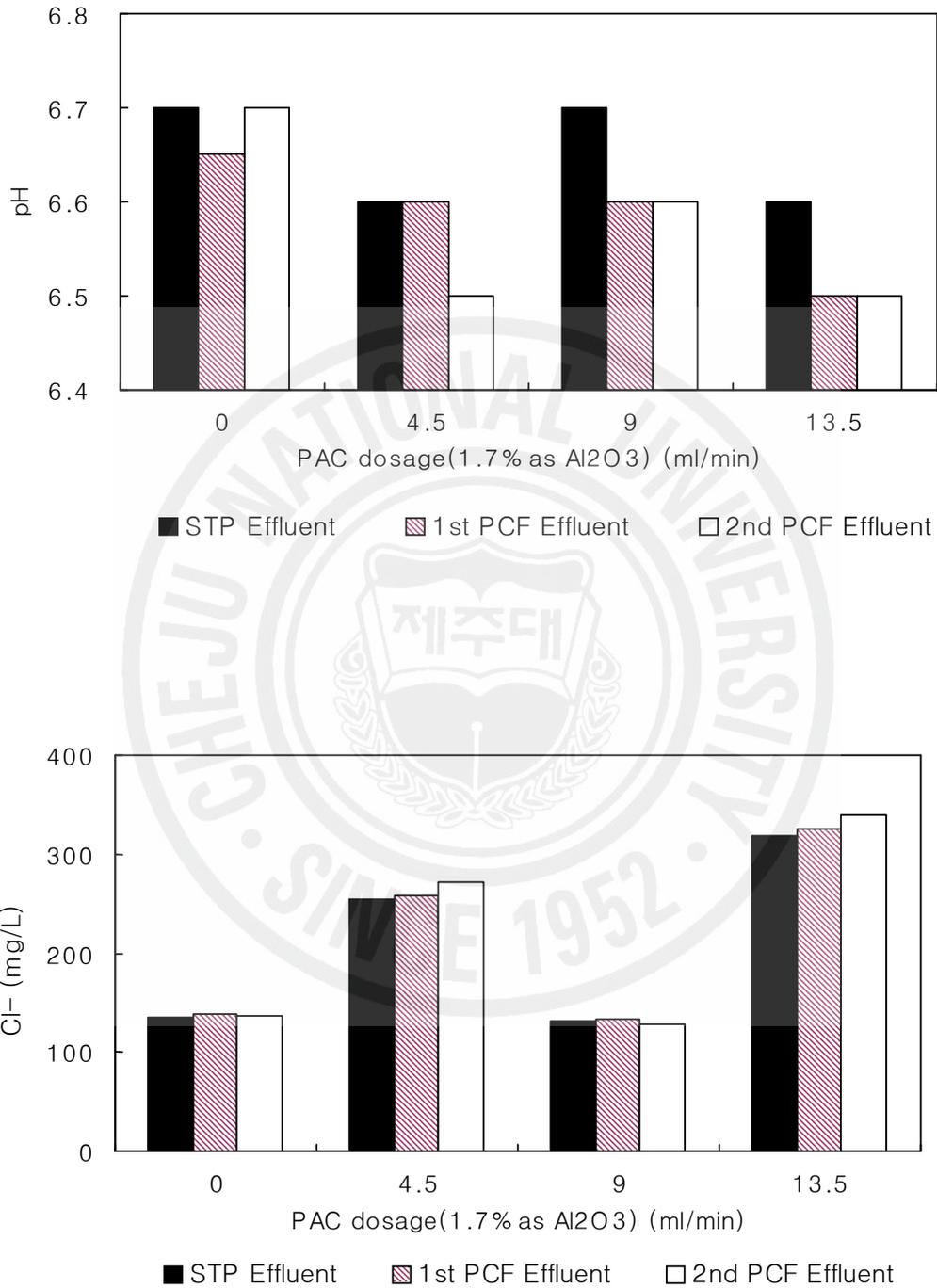


Fig. 14. The variation of pH and Cl⁻ removal with PAC dosage.

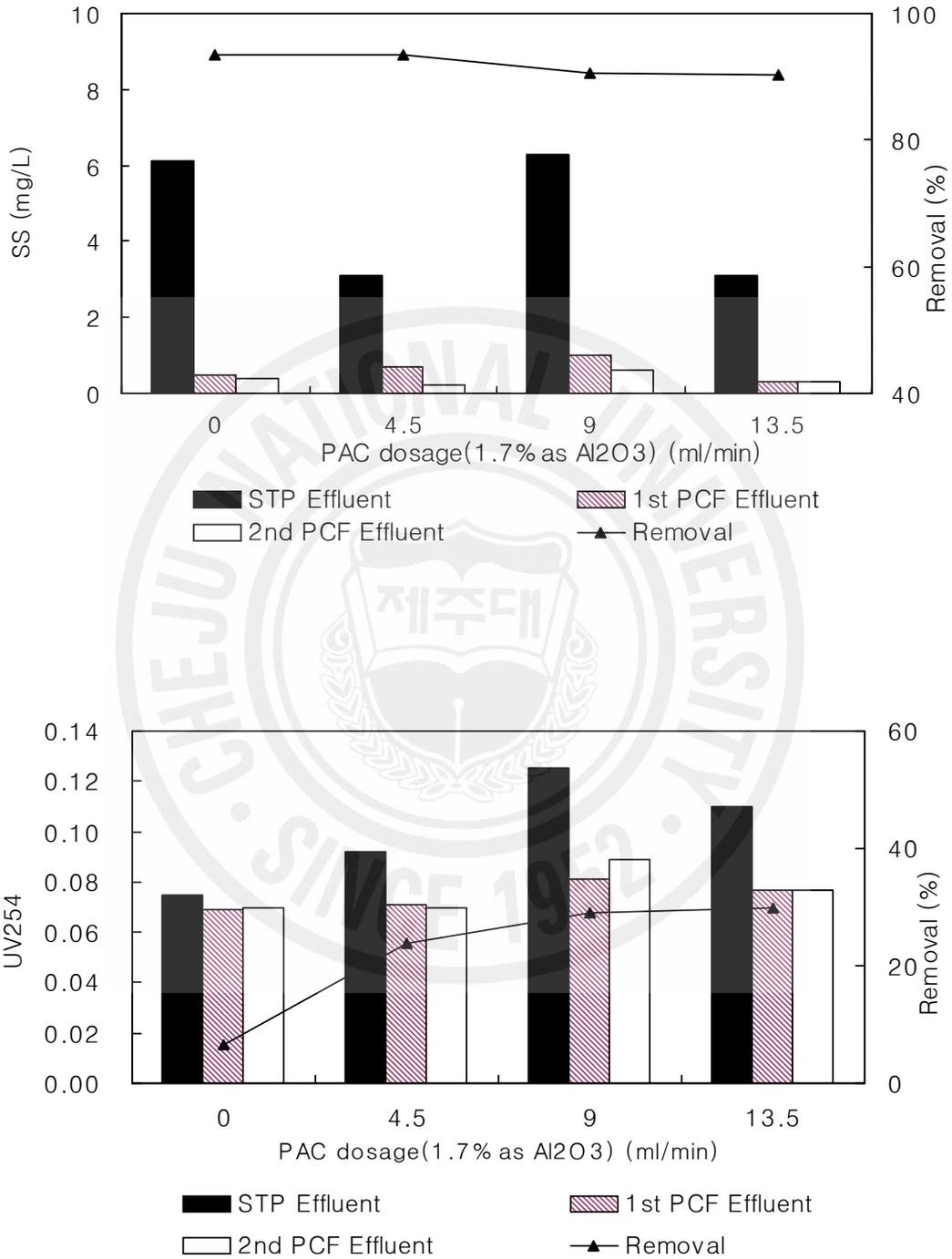


Fig. 15. The variation of SS and UV₂₅₄ removal with PAC dosage.

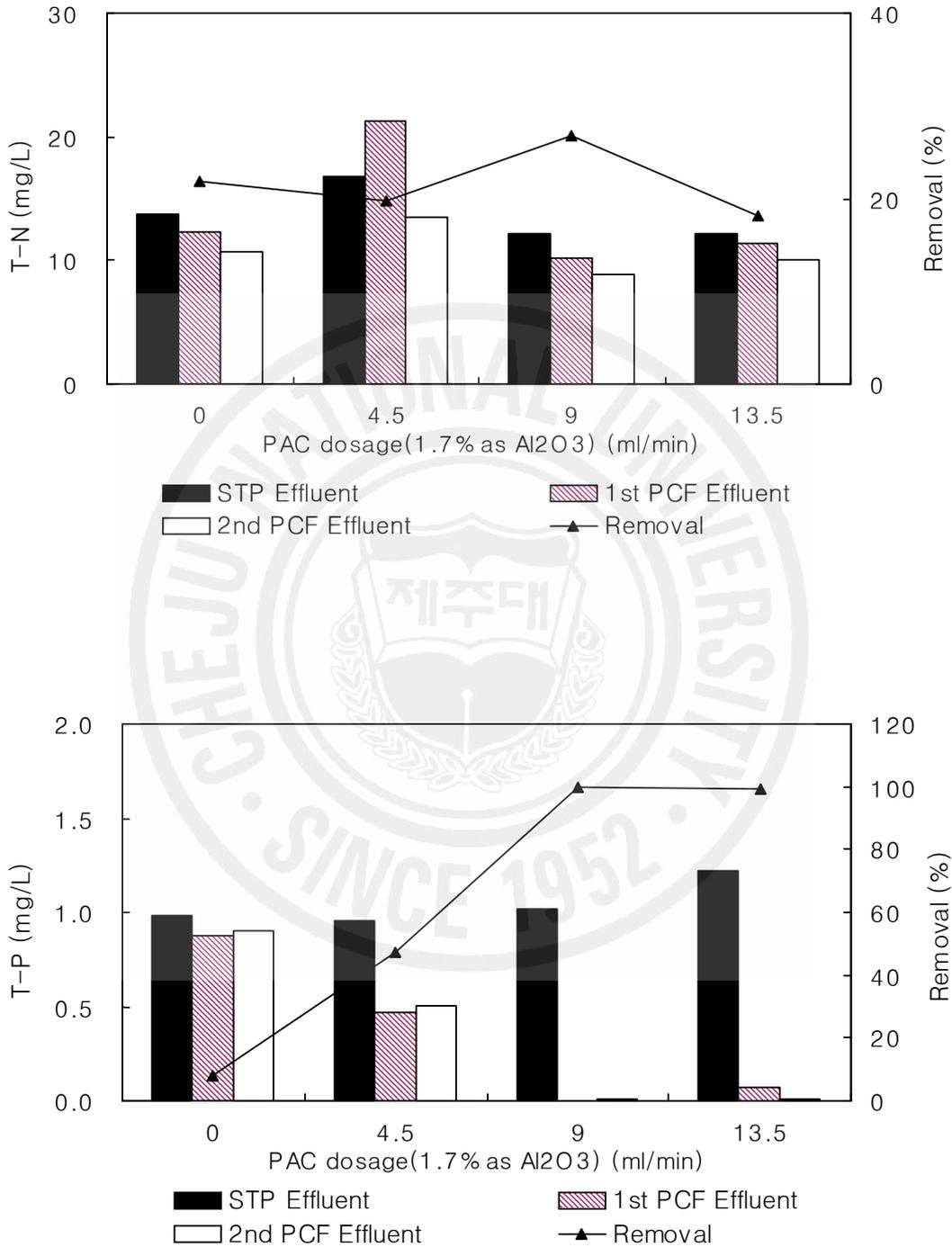


Fig. 16. The variation of T-N and T-P removal with PAC dosage.

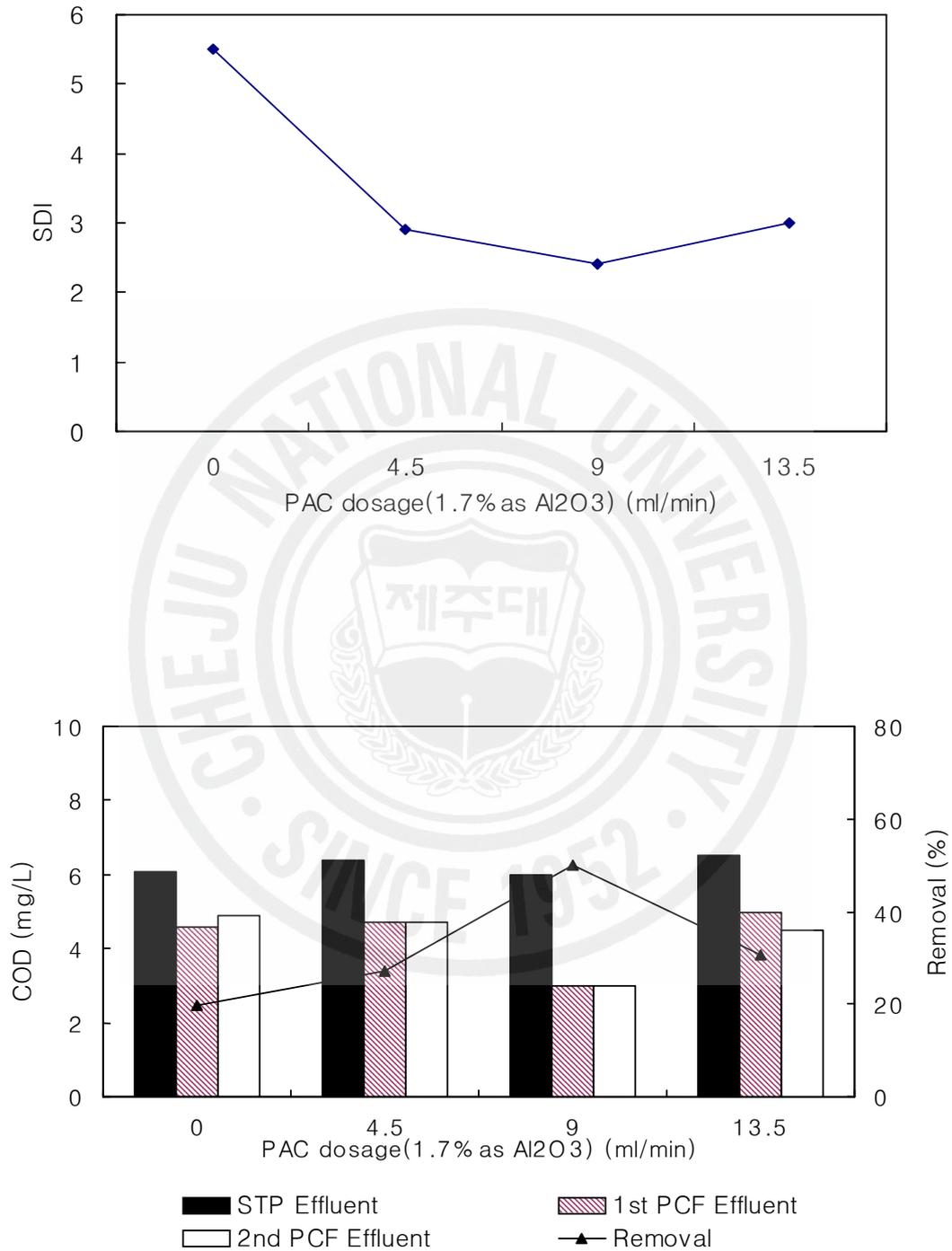


Fig. 17. The variation of SDI₁₅ and COD removal with PAC dosage.

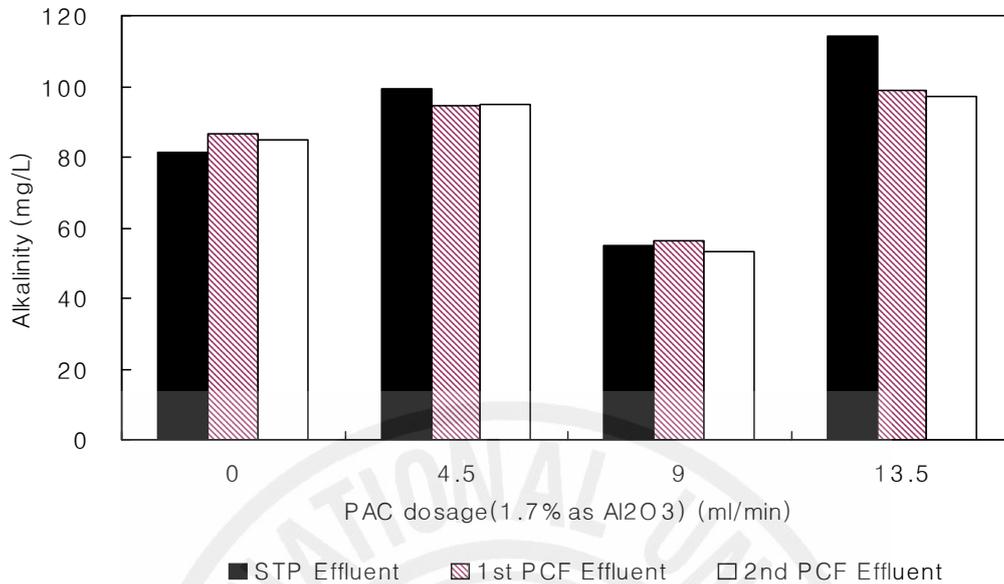


Fig. 18. The variation of Alkalinity with PAC dosage of coagulants.

Fig. 16의 T-N의 제거효율은 응집제 주입량과 상관성이 없음을 보여주고 있는데, 이는 심 등³³⁾의 연구에서도 같은 결과를 보이고 있고, 그 이유를 방류수의 T-N 성분 중에는 입자성 보다는 용존성 오염물질이 많아 응집으로 처리되지 못한 것으로 판단하였다.

T-P의 경우는 응집제 농도가 증가함에 따라 제거효율이 증가하는데 9 ml/min에서 이미 99% 수준의 제거효율을 보이고 있다.

Fig. 17의 SDI₁₅는 응집제 주입량에 따라 SDI₁₅는 감소하다가 9 ml/min에서 최소(2.5)를 보이고 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 Table 6의 결과와 일치하는 것으로, Fouling의 원인으로서는 입자성 오염물질과 더불어 용존성 오염물질이 제시되고 있는데 심 등³³⁾이 투과유속에 대한 용존성 알루미늄의 영향에 대하여 실험한 결과 용존성 알루미늄의 농도가 증가할수록 투과유속이 감소됨을 보여, 응집제 주입에 의한 수중 알루미늄의 농도가 fouling에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. COD도 SDI₁₅와 같은 경향을 보이고 있다. 응집제 주입에 의한 수질 악화의 원인으로 응집제 주입량이 과다하면 응집에 영향을 미치는 pH와

Alkalinity의 저하로 인해 침전성과 여과에 의해 제거되지 않는 작은 플록을 형성하고 재분산을 유도하여 수질이 악화된다.³³⁾ 그리고 응집제는 수중의 입자성물질 혹은 콜로이드와 인력에 의해 결합하는데 응집제 주입량이 적정량을 초과하게 되면 잉여 전하가 발생하여, 이들 양전하와 섬유 여재의 양전하가 서로 척력을 일으켜 입자의 부착을 방해하여 유출 수질을 악화시킨다.^{17,23,35)} 본 연구에서는 Fig. 13의 pH와 Fig. 18의 Alkalinity의 결과와 같이 응집제 주입에 의한 pH와 Alkalinity의 농도 변화는 없는 것으로 조사되어 SDI₁₅와 COD 제거효율의 변화 등은 응집제 주입량이 적정량을 초과한 전하역전에 의한 영향으로 사료된다.

이에 따라 적절한 응집제 주입량은 fouling 방지를 위해 낮은 SDI₁₅와 COD 등의 수질분석결과 그리고 여과지속시간에 따른 경제적 측면에서 9 ml/min으로 주입하는 것이 안정적이고 효율적이라 판단된다.

3) 역세후 수질 회복 특성과 안정화평가

역세척 후 지속적인 제거 성능 유지여부와 연속운전에 따른 2단 PCF 처리수의 탁도와 SDI₁₅ 그리고 처리수 수질, Flux변화 등을 평가하기 위하여 528 hr 동안 연속운전하였다. 연속운전은 역세압력인 설정압력 0.8 kgf/cm²가 되면 압력스위치 신호에 의해 역세공정이 시작되며, 역세가 완료되면 여과초기 조건인 유입 유량 2.0 ~ 3.0 m³/hr(평균 2.5 m³/hr)을 유지하는 방식으로 역세와 여과를 반복한다.

(1) 탁도 및 Flux 변화

PCF 유입수와 2단 PCF 처리수의 탁도, PCF 유입수의 Flux를 6시간 산술평균하여 Fig. 19에 나타내었다.

연속운전결과 PCF 유입수는 평균 1.8 NTU의 변화를 보이고, 2단 PCF 처리수는 평균 0.2 NTU의 변화를 보였다. 연속운전 기간 동안 실제 유량은 2.1 ~ 2.9 m³/hr로 운전하였다. 입자성물질의 유입에 따라 여상 폐색에 의한 Flux의 감소를 예상하였지만, PCF 유입수의 탁도와 Flux간에는 상관성을 보이고 않았다.

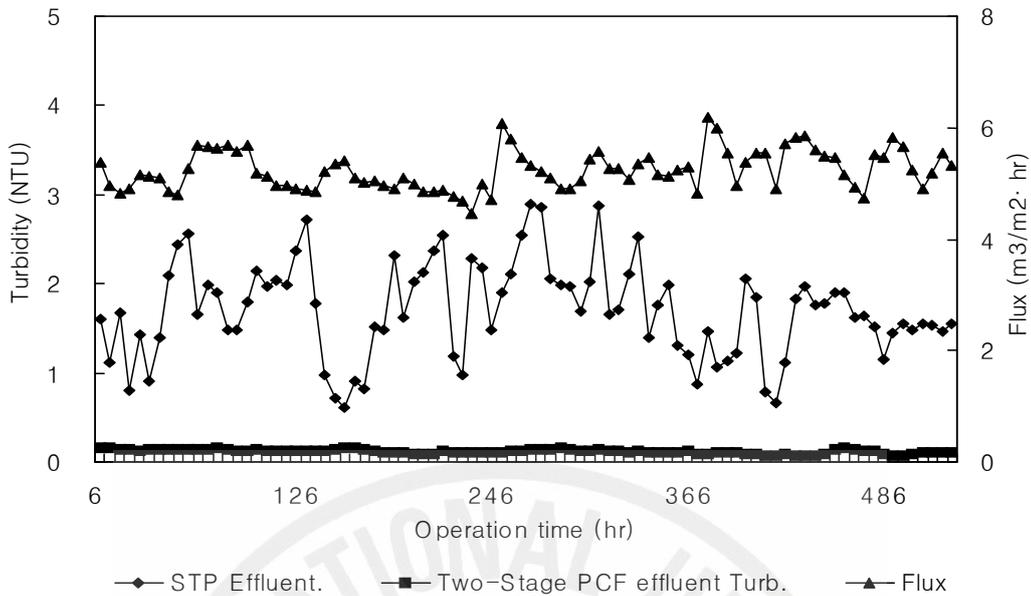


Fig. 19. The variation of turbidity and flux.

(2) PCF 유입수와 2단 PCF 처리수 수질분석결과

연속운전기간 동안 3 day마다 시료를 채수하여 pH, Cl^- , SS, UV_{254} , T-N, T-P, COD, SDI_{15} 의 결과를 Fig. 20에 나타내었다.

Fig. 11를 근거로 연속운전기간 동안 Cl^- 은 64 ~ 332 mg/L의 농도차를 보였지만 Table. 8의 결과를 보면 SS 96%, COD 35%, T-P 97%, UV_{254} 27%의 제거효율을 보였다. 이 결과를 Fig. 14 ~ 18의 9 ml/min 결과와 비교시 항목별로 큰 변화가 없어 연속운전에 따른 제거효율의 저하와 Cl^- 에 의한 영향은 없는 것으로 조사되었다. 2단 PCF 처리수의 Alkalinity는 53.9 ~ 103.7 mg/L의 농도 범위를 보였다.

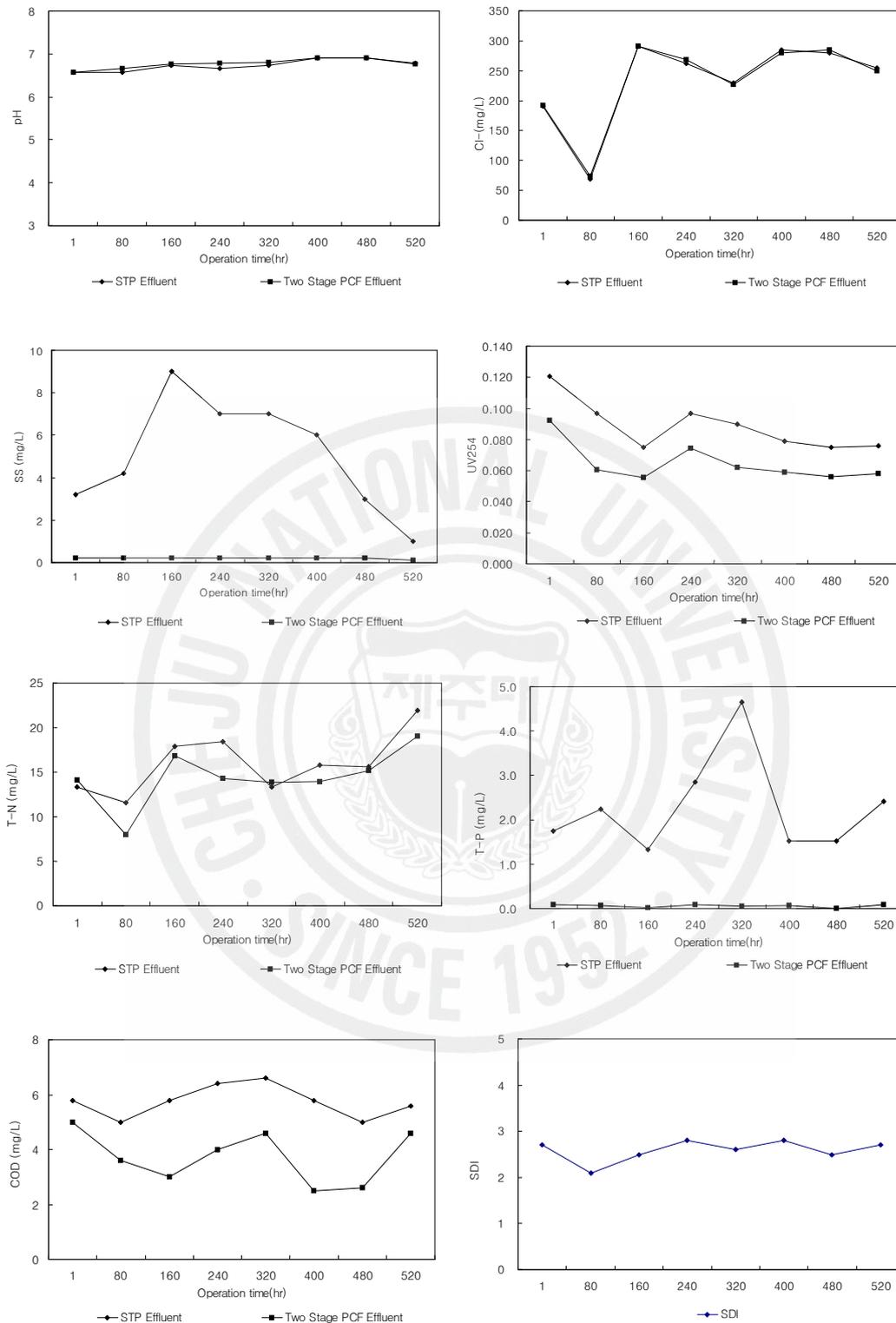


Fig. 20. The variation of water quality of STP effluent and two-stage PCF effluent.

Table 8. Comparison of water quality

| Item | Two-Stage PCF | | JeJu Plant(2003) ¹⁴⁾ | |
|------------------------|---------------|------------------------|---------------------------------|--------------|
| | STD Effluent | Two-Stage PCF Effluent | STD Effluent | BMF Effluent |
| pH | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 |
| SS(mg/L) | 5.1 | 0.2 (96%) | 6.9 | 1.1 (84%) |
| COD(mg/L) | 5.8 | 3.7 (35%) | 11.4 | 9.7 (14%) |
| Turbidity.(NTU) | 1.8 | 0.2 (89%) | - | - |
| Cl ⁻ (mg/L) | 233 | 234 (-0.3%) | 664 | 640 (4%) |
| T-N(mg/L) | 15.975 | 14.415 (10%) | 16.9 | 15.5 (8%) |
| T-P(mg/L) | 2.281 | 0.060 (97%) | 2.4 | 1.9 (20%) |
| UV ₂₅₄ | 0.089 | 0.065(27%) | - | - |
| Conductivity (mS/cm) | 1.177 | 1.038 (12%) | 3.078 | 3.001 (3%) |

2단 PCF 처리수의 pH, SS 등의 수질분석 결과와 2003년 제주지역 하수처리장 방류수 재이용 방안 연구보고서(1)의 BMF처리수의 결과¹⁴⁾를 Table 8에 나타내었다. 원수의 성상이 달라 직접적인 비교는 무의미하겠지만 2단 PCF 처리수의 수질은 제거효율면에서 BMF와 비슷하거나 더 좋은 처리효율을 보이고 있다.

2단 PCF 처리수의 농업용수 재이용을 위해 검토해 보았다. Table 8 결과를 보면 Cl⁻은 2단 PCF에 의해 제거되지 않음을 보여주고 있고, Cl⁻뿐만 아니라 T-N의 농도도 높음을 알 수 있다. 식물이 이용할 수 있는 질소의 형태는 주로 NH₄⁺와 NO₃⁻의 형태로 식물의 뿌리에 부착된 미생물이 유기질소를 분해하여 식물이 이용할 수 있는 형태로 전환시켜 줌으로써 최종적으로 식물이 이를 흡수하게 된다. 일반적으로 하수처리장 방류수내에 함유되어 있는 질소농도는 농작물에 해를 줄 정도로 고농도가 아니기 때문에 하수처리장 방류수를 농업용으로 이용하더라도 질소비료를 추가로 공급해야 한다.³⁴⁾ 정²⁾은 오수처리수를 벼의 관계용수로 이용하여 벼 재배에 미치는 영향을 조사 분석하였다. 그 결과 관계용수로 재이용시 벼의 생육 및 수확량에 나쁜 영향은 나타나지 않았고 오히려 긍정적인 영향이 나타났다고 했다.

자연정화처리가 식물을 이용한다는 측면에서 하수처리장 방류수의 농업용수 이용은 부족한 관개용수의 확보와 식물의 성장에 필요한 질소와 인을 포함한 영양물질의 공급이라는 장점을 갖고 있지만, 방류수중에 포함된 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우는 토양중에서 빠른 이동으로 지하수중의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도를 증가시킬 우려가 있고, NH_4^+ 는 자연계내에서의 산소소모량이 BOD에 의한 것의 2.7배의 산소를 소모³⁶⁾하여 하수처리장 방류수를 넓은 지역에 주기적으로 살포할 경우, T-N에 대해서는 토양중 거동과 지하수에 미칠 수 있는 영향에 대하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 하지만 방류수 중 Cl^- , T-N의 농도가 조절이 되면 2단 PCF 만으로도 다양한 목적의 재이용수 수질조건을 만족할 것으로 판단된다.

4) RO시스템의 적용과 수질특성

2단 PCF의 연속운전 12 day부터 처리수를 RO에 유입시켜 적정처리 여부를 확인하였다. 결과는 1시간 산술평균 하였으며, Fig. 21에 나타내었다.

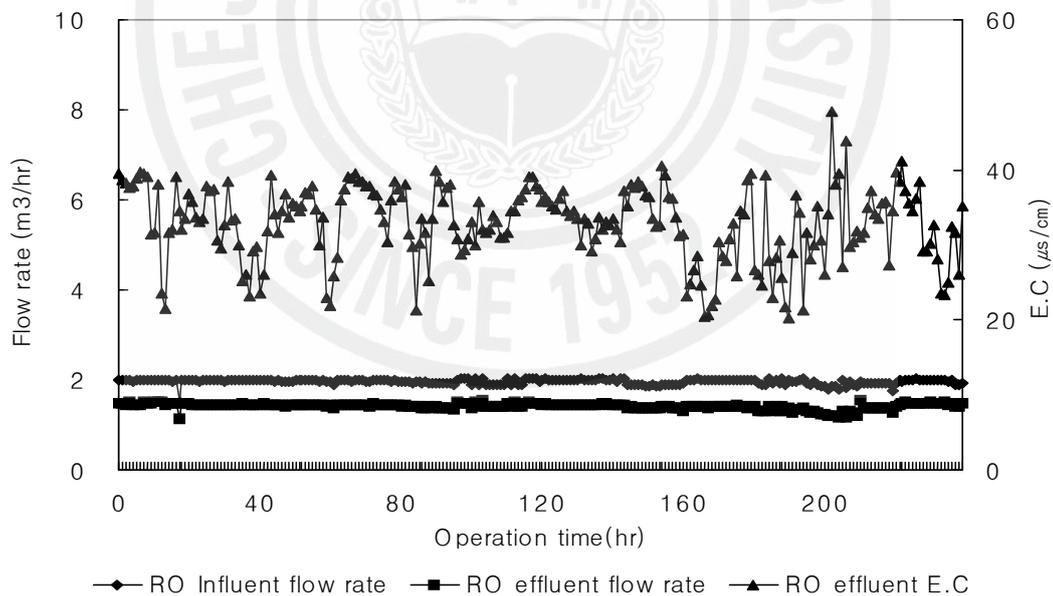


Fig. 21. The variation of quality before and after Two-stage PCF/RO Process

운전기간 240 hr 동안 압력은 9 kgf/cm^2 으로 운전하였으며, 운전기간동안 RO 유

입유량과 유출유량의 변동은 없었다. RO유입수의 E.C는 0.4 ~ 2.9(1.3) mS/cm, RO처리수의 E.C는 20.3 ~ 47.9(33.0) μ S/cm의 범위를 보여, 97.5%의 평균제거율을 보였다. 이 기간 동안 3 day마다 시료를 채수하여 수질분석 결과를 Table 9에 나타내었다.

Table 9. Results of water quality by Two-Stage PCF/RO

| Item | STD Effluent | Two-Stage PCF Effluent | RO Effluent | | |
|------------------------|--------------|------------------------|-------------|-------|-------|
| | | | Max. | Min. | Aver. |
| pH | 6.7 | 6.7 | 6.0 | 5.9 | 6.0 |
| SS(mg/L) | 5.9 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| COD(mg/L) | 5.8 | 3.9 | 0.8 | 0.4 | 0.6 |
| Cl ⁻ (mg/L) | 203 | 207 | 11 | 2 | 5 |
| T-N(mg/L) | 15.312 | 13.318 | 0.520 | 0.169 | 0.362 |
| T-P(mg/L) | 2.037 | 0.069 | 0.011 | 0.000 | 0.003 |
| UV ₂₅₄ | 0.097 | 0.069 | 0.013 | 0.000 | 0.006 |
| Conductivity(mS/cm) | 1.083 | 1.012 | 0.040 | 0.021 | 0.033 |

비록 짧은 기간 동안 연속운전을 하였지만, 운전기간동안 압력의 변화는 없는 것으로 조사되었고, 유입유량과 유출유량이 일정하게 유지됨에 따라 fouling에 의한 영향은 없는 것으로 사료된다. 이로써 2단 PCF은 RO전처리공정으로써 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

농업용수로써 재이용 가능성을 보기 위한 2단 PCF/RO 수질분석결과를 보면 제주도하수처리장 방류수의 특징이었던 과도한 Cl⁻의 문제가 해결됨은 물론 SS와 유기물질, T-N, T-P 등도 제거됨을 보였다. 2단 PCF/RO 처리수 수질을 국내의 농업용수 기준^{3,34}과 비교해보면 분석 전항목에서 기준을 밑도는 결과를 얻을 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구는 RO 전처리공정으로써 2단 PCF의 적용 가능성과 2단 PCF/RO 처리수의 농업용수로의 재이용 가능성을 보기위해 본 연구를 수행하였다.

1. 하수방류수의 Cl^- 농도의 추정을 위하여 E.C와의 상관성을 보았는데 0.9923의 높은 상관성을 보였다, 이것을 근거로 Cl^- 농도를 추정해보니 연구기간동안 74 ~ 989 mg/L의 변동을 보였다.
2. 응집제를 주입하면 농도에 관계없이 처리수의 탁도는 안정적으로 처리됨을 알 수 있었고, 여과의 단점으로 지적되고 있는 초기탁질누출과 여상과과(Breakthrough)에 의한 탁도 증가현상은 기존 연구 결과에 비하여 그 폭이 매우 감소되었거나 탁도의 증가는 볼 수 없었다.
3. 2단 PCF의 응집제 주입량별 최적 조건을 평가해본 결과 fouling 방지를 위해 낮은 SDI_{15} 와 COD 등의 수질분석결과 그리고 여과지속시간에 따른 경제적 측면에서 9 ml/min으로 주입하는 것이 안정적이고 효율적이라 판단된다.
4. 역세척 후 지속적인 제거 성능 유지여부와 연속운전에 따른 2단 PCF 처리수의 탁도와 SDI_{15} , 처리수 수질 그리고 Flux변화 등을 평가하기 위하여 528 hr 동안 운전한 결과, Breakthrough 현상은 없었으며, RO에 적용하기 위한 3.0이하의 SDI_{15} 와 안정적인 처리수질을 보여 RO전처리공정으로써 적합하다고 판단된다.
5. 2단 PCF 처리수의 농업용수 적용은 Cl^- 농도 뿐만 아니라 T-N의 농도가 높아 농업용수의 직접 사용은 다소 무리가 있다고 판단된다. 하지만 방류수 중 Cl^- , T-N의 농도가 조절이 되면 2단 PCF 만으로도 다양한 목적의 재이용수 수질조건을 만족할 것으로 판단된다.

6. 2단 PCF 처리수를 RO에 유입시켜 적정 처리여부를 확인해 본 결과 운전기간 동안 압력의 변화없이 안정적으로 운전하였으며, 제주도하수처리장 방류수의 특징이었던 과도한 Cl^- 의 문제가 해결됨은 물론 SS와 유기물질, T-N, T-P 등도 제거됨을 보였다. 2단 PCF/RO 처리수 수질을 국내외 농업용수 기준과 비교해보면 분석 전항목에서 기준을 밑도는 결과를 얻을 수 있었다.

이상의 결론을 통해 fouling 감소와 안정적인 처리수질을 보여 RO 전처리공정으로써 2단 PCF 적용이 가능하다고 판단되며, 2단 PCF/RO 처리수는 농업용수는 물론 기타 다른 용수로의 재이용도 가능하리라 판단된다.



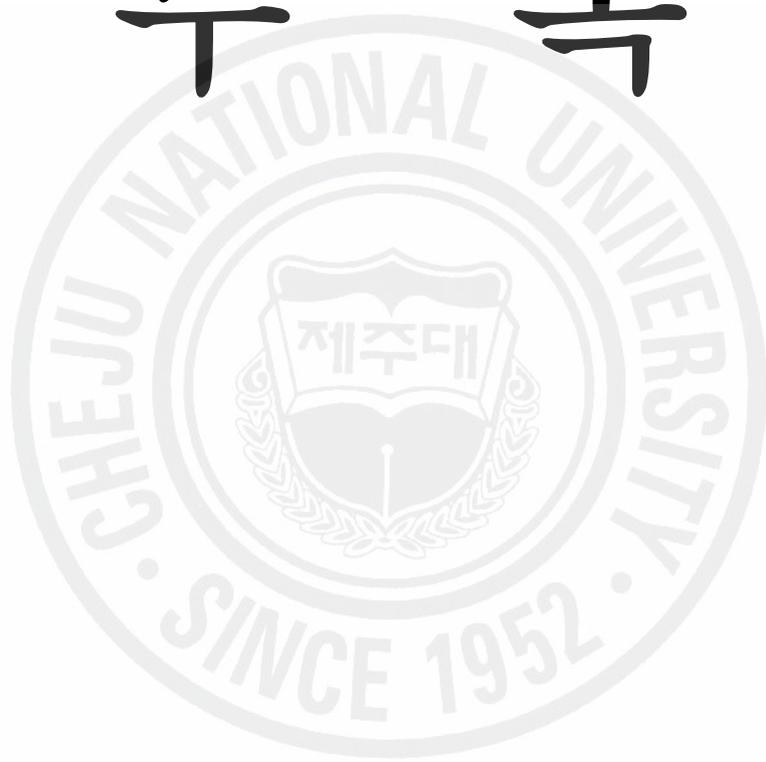
참고문헌

1. 환경부, 중수도 활성화를 위한 제도개선 T/F팀 구성·운영 보고서, pp. 151(2004).
2. 정광욱, 농업적 용수재이용을 위한 하수처리수의 적정 재처리 연구, 건국대학교 석사학위논문(2003).
3. 환경부, <http://www.me.go.kr/>
4. Hamoda, M. F., Al-Ghusain, I. and Al-Mutairi, N. A., "Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse", *Desalination* 164, 203-211(2004).
5. Fahmi, Nishijima, W. and Okada, M., "Improvement of DOC removal by multi-stage AOP-biological treatment", *Chemosphere* 50, 1043-1048(2003).
6. 안규홍, 안석, 정민우, 김준성, 맹승규, 김기팔, 홍준석, Zubair Ahmed, "하수 2차 처리수 재이용을 위한 자와선/과산화수소 고도산화공정", 대한환경공학회 2003 춘계학술연구발표회 논문집, KAIST, 904-907(2003).
7. 이철우, 한승우, 손정기, 손인식, 강임석, "하수 2차 처리수 재이용을 위한 직접여과 공정의 적용", 대한환경공학회지 26(6), 713-718(2004).
8. Tam, L.S., Tang, T.W., Lau, G.N., Sharaa, K.R. and Chen, G.H., "A pilot study for wastewater reclamation and reuse with MBR/RO and MF/RO systems", *Desalination* 202, 106-113(2007).
9. Melin, T., Jefferson, B., Bixio, D., Thoeye, C., De Wilde, W., Ee Koning, J., van der Graaf, J. and Wintgens, t., "Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse", *Desalination* 187, 271-282(2006).
10. 박영규, 이철희, 신진수, 김충환, 양용운, "산소활성슬러지 - 한외여과 결합공정에 의한 염색종합폐수의 처리", 대한환경공학회지, 17(11), 1145-1151(1995).
11. 이은우, RO와 NF 막을 이용한 하수처리장 2차 유출수의 재이용, 호서대학교 석사학위논문(2003).

12. 김종혁, 하수 처리수 재이용을 위한 사여과 및 활성탄 흡착탑의 설계변수 연구, 울산대학교 석사학위논문(1997).
13. 김화석, SFC-Biofilter에 의한 도시하수 재이용을 위한 중수도 System의 구성과 관한 연구, 동아대학교 석사학위논문(2002).
14. 제주도, 제주지역 하수처리장 방류수 재이용 방안 연구 보고서(1)(2003).
15. 김수환, 강석태, 박희경, “RO을 이용한 해수 담수화에 있어서 전처리 최적화 방안”, 대한환경공학회지, **20**(10), 1367-1375(1998).
16. 안용태, 박달준, 윤창한, 배시열, 신향식, 박희경, “중력식 섬유여과기 (GFF-Filter)를 이용한 하수처리장 방류수의 부유물질 제거”, 대한환경공학회 2006 추계학술연구발표회 논문집, 55-62(2006).
17. 차재환, 이정준, 임정훈, 김효수, 김종락, 김창원, “섬유사 여과기의 응집-침전 공정 대체가능성 평가”, 대한환경공학회 2006 추계학술연구발표회 논문집, 374-381(2006).
18. 제주특별자치도청, <http://www.jeju.go.kr/>.
19. 최충호, “Poly-Aluminium Chloride(PAC) 응집제의 제조 및 특성에 관한 연구”, 충남대학교 석사학위논문, pp. 19-23(2004).
20. 김수환, 박희경, “인라인 주입방식을 활용한 응집-정밀여과 공정의 효율향상”, 대한환경공학회지, **26**(1), 7-14(2004).
21. 박진아, 여재의 유효경이 여과효율에 미치는 영향, 서울시립대학교 박사학위 논문, pp. 8-15(2006).
22. 정윤희, 완속여과지의 여과속도 및 여과수질 향상 방안, 충북대학교 석사학위 논문, pp. 8-13(2005).
23. 정민기, 응집제 직접주입방식을 이용한 섬유사 여과기의 성능 개선 연구, 부산대학교 석사학위논문(2005).
24. 차재환, 섬유사 여과기의 여과 특성과 동적 거동, 부산대학교 석사학위논문 (2007).
25. 이정혜, Full-scale 섬유사 여과기의 최적 운전 조건 도출, 부산대학교 석사학위논문(2006).
26. 김오식, 이용운, 막기술의 응용과 실제, 환경관리연구소, pp. 588(2005).

27. 환경관리공단, 환경기술검증보고서(섬유사 다발의 비틀림, 이완장치를 이용한 하수방류수의 부유물질 여과기술(Twist Filter))(2004).
28. 이철우, 하수 2차 처리수 재이용을 위한 고도처리, 부경대학교 박사학위논문 (2005).
29. 김승건, 막분리 공정을 이용한 분뇨처리장 방류수의 고도처리, 제주대학교 석사학위논문, pp. 27(1998).
30. 윤중섭, 역삼투법 해수담수화 시설의 회수율 증가 및 적조제거 전처리공정 최적화에 관한 연구, 경남대학교 박사학위논문, pp. 28(2005).
31. Stephenson, R. V, "Removal of aluminosilicates from water using complete conventional and direct filtration processes", *master of science thesis*, Iowa State University, Iowa, Ames(1980).
32. Glaser, H. T. and Edzwald, J. K., "Coagulation and direct filtration of humic substances with polyethylenimine", *J. Env. SCI & Tech.*, **13**(3)(1979).
33. 심주현, 김대환, 서형준, 정상원, "응집·정밀여과에 의한 도시하수의 처리", *대한환경공학회지*, **27**(6), 581-589, 2005.
34. 환경관리공단, 하수처리수 재이용 기술에 관한 연구(2001).
35. 정호진, 송수욱, "응집인자 특성에 관한 연구", *한국수처리학회지*, **8**(1), 9-18(2000).
36. 최의소, 질소와 수질환경, *첨단 환경기술* 3월호(1995).

부 매



I. 하수처리장 방류수 재이용 사례분석

1. 국내 사례^{3, 14, 34)}

1) 충남 천안하수처리장

상류 하천길이가 짧아 갈수기에 건천화로 인한 상수원 및 농업용수 등 물이 부족한 지역이고, 관거정비로 하천으로 방류되는 하수를 차집관거를 통해 처리하게 됨에 따라 하천수가 더 줄어들어 농업용수 부족 문제가 발생하였다. 이에 천안시에서는 하수처리장 방류수를 농업용수로 공급하고 있으며, '95년부터 천안시 용곡동, 신방동 및 아산시 배방면 장재리 일원 180 ha 농경지에 연간 1,343천 m³의 농업용수를 공급하여 가뭄 피해 없이 경작할 수 있도록 지원하고 있다. 이에 가뭄에도 물 걱정 없이 농사를 지을 수 있게 되어 농민들로부터 큰 호응을 얻을 뿐만 아니라 농민들 개별적으로 지하수를 사용하던 것을 하수처리장에서 펌프를 이용 공급하게 됨에 따라 농민들의 경제적 부담이 줄어들었고, 하수처리장에 대한 주민불신을 해소하여 하수처리장 증설시 원만한 사업추진이 가능하였다.

2) 경기 부천하수처리장

중동 및 상동 신도시 개발 등으로 급격한 인구증가와 산업화로 상수도 공급능력이 한계에 도달하였고, 하천 복개, 콘크리트 건물 설치로 인한 친수공간이 절대 부족한 도심 한가운데에 하수처리장 방류수를 재이용한 인공생태하천을 조성하여, 일 45천 m³을 재이용할 수 있는 재처리시설을 설치하여 인공생태하천인 “시민의 강” 유지용수로 공급하고 있다. 인공하천 조성을 통한 부천시민들의 정서함양 및 삶의 질을 향상하는 데 크게 기여하고 하수처리장에 대한 고정관념 전환하고 있다. 이외에도 수세식 화장실 용수, 조경용수, 공업용수, 살수용수 등으로도 재이용하고 있다.

3) 대구 신천하수처리장 방류수의 하천 유지 용수 이용

대구시는 하수처리율이 1999년 현재 85.8%로써 전국 1위로 알려져 있지만, 도심을 흐르는 하천은 하수를 거의 차집함으로 인해 유지용수가 부족하게 되었다. 대구광역시의 신천 하수처리장은 신천에 유입되는 대구시의 중구, 동구, 남구, 북구, 수성구 지역의 하수를 처리하여 금호강으로 방류하는 대구에서 가장 큰 규모의 하수처리장으로써 하루 처리량이 680,000 m³/일이다. 처리방식은 표준 활성법 이고, 하수처리 인구는 1,081,850명에 달한다.

이 처리장은 처리 방류수 680,000 m³/일 중 100,000 m³/일을 신천의 하천유지용수를 보충해 줄 목적으로 신천 상동교까지 송수하여 맑고 푸른 물이 흐르도록 하고 있다.

4) 광주천 건천화 방지사업

광주천은 하수처리장 차집관거가 하천고수부지 양안으로 매설되어 하천유입 하수관거가 대부분 차집관거에 연결되어 있기 때문에 갈수기에는 하천의 유하량 부족으로 인해 저질토의 퇴적 및 오염이 가속화되어 도심하천으로써의 기능을 상실하고 있었다. 이에 광주천의 적정유지용수를 확보하고, 하천의 기능을 재생시키며 하천의 오염방지를 통하여 시민에게 쾌적하고 친밀감있는 하천환경을 조성코자 하수처리장 방류수를 이용하게 되었다. 광주천 건천화 방지사업으로 하천 유지용수의 안정적인 확보, 하천의 오염도 저하 및 수질기준을 달성할 수 있었으며, 수변환경의 정화로 친수성과 시민의 휴식공간을 제공하여 수자원의 효율적인 이용을 가능하게 하였다.

5) 경기 가좌하수처리장

인천광역시 동구에 소재한 INI스틸 인천공장은 연간 365만 m³ 이상의 상수도를 냉각용수로 사용하고 약 40억원에 달하는 비용을 상수도 요금으로 지출하여 왔다. 이처럼 과도한 상수도 요금 부담과 가뭄 시 용수부족 문제를 해결하기 위하여 INI스틸에서는 인천시 가좌동 하수종말처리장의 방류수를 재처리하여 공업용수로 이용하기 위한 프로젝트를 추진하였다. 결과적으로 INI스틸은 2002년 9월 인천광역시와 가좌하수처리장으로부터 1일 16,000 m³의 방류수를 이용하는데 필요한 제반사항에 대한 협약을 체결하였고, 2002년 11월에 1일 12,000 m³의 공업

용수를 생산할 수 있는 재처리시설 공사를 완료하여 현재 가동중에 있다. 하수처리장 방류수를 재처리하기 위한 설비를 비롯하여 가좌하수종말처리장에서 방류수를 공장까지 송수해오는데 필요한 배관공사(직경 500 mm, 연장 1.5 km)등에 총 76억원이 투자되었지만 INI스틸은 방류수를 공업용수로 재이용함으로써 연간 약 34억 5천만원의 상수도 요금을 절약하는 효과를 얻고 있다.

Table. 1 하수처리장 방류수 재이용사업 추진현황³⁾

(단위 : 톤/일, 백만원)

| 용도별 | 시설명 | 재이용량 (처리수질) | 사업기간 | 사업내용 | 총사업비 (국고) | 사업효과 |
|----------------|----------|-------------------|---------|-------------------------------------|--------------------|---|
| 공업 용수 | 오산 | 12,000 (BOD 2) | '06~'08 | 압송관로 L=4.88km 역삼투·펌프시설 1식 | 15,851 (10,000) | 인근 반도체·제지업체에 공업용수를 공급하여 톤당 850원 절감효과 기대 |
| 생활 용수 | 송도 | 13,000 (BOD 3) | '06~'08 | 압송관로 L=20km 모래·활성탄여과, 펌프시설 1식 | 20,070 (6,021) | 청소용수, 조경용수 등을 송도신도시에 공급함으로써 자원순환형 생태도시 건설에 기여 |
| 농업 용수 | 강진 | 5,000 (BOD 2) | '06 | 압송관로 L=2.0km 펌프시설 1식 | 1,200 (840) | 농업용수를 공급하여 농민숙원사업 해결 |
| 하천 유지 용수 | 공주 | 10,000 (BOD 2) | '06~'07 | 압송관로 L=20km 활성탄여과·펌프시설 1식 | 9,500 (6,650) | 제민천의 복원으로 역사·문화·환경의 도시로 건설 |
| | 천안 | 30,000 (BOD 3) | '06 | 압송관로 L=11.8km 펌프시설 1식 | 8,000 (5,600) | 천안천, 원성천 및 성정천의 생태하천 조성 및 친수환경 제공 |
| | 여수 | 12,000 (BOD 6) | '06~'08 | 압송관로 L=6.1km 펌프·부대시설 1식 | 6,613 (4,489) | 해양엑스포 개최와 연계하여 연등천을 해양도시 내 새로운 수변문화 공간으로 조성 |
| | 고창 | 11,000 (BOD 6) | '07~'08 | 압송관로 L=5.8km 펌프시설 1식 | 1,913 (1,339) | 고인돌 및 고창읍성과 연계한 생태하천 조성 및 친수환경제공 |
| | 목포 남해 | 35,000 (BOD 8) | '07 | 압송관로 L=600m 펌프시설 1식 | 1,500 (1,050) | 입암천 하천정비사업과 병행 추진하여 사업효과 증대 |
| | 고흥 | 3,000 (BOD 5) | '07~'08 | 압송관로 L=3.2km 펌프시설 1식 | 3,000 (2,100) | 고흥천 하천정비사업과 병행 추진하여 사업효과 증대 |
| | 보성 | 2,500 (BOD 5) | '07~'08 | 압송관로 L=2.5km 펌프시설 1식 | 700 (490) | 동윤천·평우천 하천정비사업과 병행 추진하여 사업효과 증대 |
| | 구미 | 30,000 (BOD 2) | '07~'08 | 압송관로 L=3.5km 펌프시설 1식 | 4,000 (2,800) | 구미공단내 하천유지용수 및 인근공원에 조경용수 공급 등 친수환경 제공 |
| | 고령 | 4,500 (BOD 3) | '07 | 압송관로 L=1.55km 펌프시설 1식 | 1,000 (700) | 대가야 역사 관광지내 하천유지용수 공급으로 경관 및 수질보전 등 친수기능 유지 |

2005년도 기준으로 연간 66.4억 m³의 하수처리장 방류수 중 6.9%인 4.6억 m³을 재이용하고 있으며, 이중 절반은 처리장내 청소수, 세척수, 냉각수 등으로 재이용되고 있으며, 나머지는 주로 하천유지용수, 농업용수, 공업용수 등으로 재이용되고 있다.³⁴⁾

이밖에 환경부에서 발표한 하수처리장 방류수 재이용 사업 추진현황을 Table. 1에 나타내었다.

2. 국외 사례^{14,34)}

1) 일본의 사례

일본의 하수처리장 방류수 재이용 경위는 동경올림픽이 개최되었던 1964년에 일본에서는 동경 인근 지방이 겪었던 긴 가뭄을 계기로 하여 물의 순환이용의 검토가 시작되었다. 그리하여 공장 및 대규모빌딩에서의 순환이용이 이뤄졌으며, 東京都 및 名古屋市 등에서는 하수처리수를 공업용 수도원수로서 재이용하게 되었다. 또한 고급수를 필요로 하지 않은 공장과 분뇨처리장에서는 하수처리장 인근에 위치할 경우 하수처리장 방류수를 재이용하게 되었다. 여전히 댐 건설에 의한 수자원개발이 진행되었음에도 불구하고 경제성장과 인구의 도시집중에 의해, 關東, 東海, 近畿, 北九州 등의 지역에서는 공업용수와 도시생활용수의 수요증가로 용수수급의 어려움이 계속되었다. 이러한 상황에서 大阪市에서는 1970년 만국 박람회 개최에 즈음하여 도시의 상징인 大阪城의 경관을 보호하기 위해 주변 연못인 外湖의 수위감소에 대한 대책으로서 하수고도처리수의 도입을 개시하였다. 이것이 바로 일본 최초로 하수처리수를 조경용수로 이용한 예이다. 이러한 하수처리수의 재이용은 1980년경부터 하수도건설에 수반하여 수원이 고갈된 도시내의 작은 하천에 하수처리수를 도입하여 수변공간을 회복시킴으로서 하수도 홍보도 겸할 수 있었기 때문에 각지에서 하수처리수의 재이용이 이뤄지게 되었다. 이러한 하수처리장 방류수의 재이용 형태가 일본에서의 하수처리장 방류수 재이용의 중심적인 형태로 자리잡게 되었다.

(1) 千葉市の 하수처리장 방류수 재이용사업

千葉縣은 확보 가능한 수원이 부족한 상태에서 幕張地區에 새로운 都心을 건설하여 과밀한 東京의 기능을 흡수하고자 하였는데, 인접지구에 있는 花見川 하수종말처리장의 방류수를 신도심의 수세용수 등으로 순환이용하게 되었다. 하수처리장 방류수의 공급구역 면적은 0.62 km²(계획 1.1 km²)로 幕張 신도심 지구의 本市會場, 상업빌딩, 호텔, 업무빌딩, 그밖에 구역 내에 설치된 공원의 정원에도 공급되었다. 하수처리장 방류수의 공급은 펌프 압송식으로 공급받는 빌딩의 저수조로부터 저수위의 신호를 받으면 펌프가 작동되어 하수처리장 방류수가 압송되는 구조로 되어 있다. 하수처리장으로부터 가장 멀리 있는 빌딩은 2.76 km에 위치해 있으며, 배수관의 구경은 100 ~ 300 mm이며 관종은 덕타일 주철관이다. 하수처리수의 이용요금은 210엔/m³으로 종량제이며, 공급받는 빌딩이 공공시설일 경우 요금이 절반으로 줄어든다. 1998년 하절기까지 하수처리장 방류수 재이용으로 인한 문제는 발생하지 않았다.

(2) 神戸市 六甲아일랜드 물 循環事業

신호시도 확보 가능한 수원이 부족한 도시이지만, 향만기능의 강화 및 확대를 위해 조성한 매립지에 새로운 職住近接의 업무지구를 설치하면서 건너편 해안의 東灘하수처리장의 방류수를 지구내의 수세용수, 살수용수로 순환 이용하게 되었다. 하수처리수의 공급면적은 1.66 km²로서 약 30개의 상업빌딩, 업무빌딩, 학교, 녹지에 공급되고 있다. 하수처리장 방류수의 공급 능력은 2,100 m³/일이고 1997년도의 실적은 일 최대 급수량 995 m³, 일평균 급수량 415 m³이었다. 1986년 4월에 공급이 개시되었으며, 하수처리장 방류수의 추가처리시설은 東灘하수처리장과 六甲아일랜드 내에 있는 리사이클 센터에 각각 설치되어 있다. 東灘하수처리장에서는 2차처리수(활설오니법)에 급속여과처리를 행하여 리사이클 센터로 압송한다. 리사이클 센터에서는 오존 처리와 염소처리 추가로 행한 후 각 수요처로 공급한다. 공급은 펌프 압송방식으로서 배수관의 총연장은 6 km이고, 배수관의 직경은 50 ~ 300 mm, 재질은 경질염화비닐관 및 주철관이 이용되고 있다. 하수처리장 방류수의 재이용 요금은 업무용인 경우 200엔/m³, 일반용은 120엔/m³으로서 종량제를 따르고 있다. 하지만 살수용수의 수요가 계절적으로 변동이 심할 뿐만

아니라 시설용량이 정상적인 이용수량을 크게 상회함으로서 경영상의 문제를 안고 있는 실정이다.

(3) 福岡市 하수처리장 방류수재이용 사업

福岡市에서는 1978년에 겪은 혹독한 가뭄경험을 계기로 중심시가지부터 순차적으로 광역순환방식에 의한 잡용수도의 건설이 추진될 수 있었다. 1997년 현재 공급구역면적은 7.7 km²이고 건물의 연상면적이 3,000 m²이상이거나 급수관의 관경이 50 mm이상인 건물을 대상으로 하수처리수의 공급을 행하고 있다. 하수처리수량은 4,500 m³/일이고, 일 최대 실공급 수량은 3,900 m³/일이었다. 1980년 6월에 공급이 개시되었으며, 공급능력은 400 m³/일, 공급받는 수요처는 3개소였다. 하수처리수의 추가처리시설은 中部하수처리장에 설치되었으며, 中部하수처리장의 2차처리수(A/O법 처리수)를 원수로 하여 급속여과, 오존처리, 염소주입의 순서로 처리하여 공급하고 있다. 공급은 가압탱크에 의한 압송방식으로 배수관의 총연장은 48 km이다. 배수관의 직경은 75 ~ 300 mm이고, 관종은 모르타르 또는 에폭시 라이닝 덕타일 주철관이 사용되고 있다. 하수재이용 요금은 중량 누진제를 따르고 있으며 평균적으로 356엔/m³이다.

(4) 熊本市의 有名海에서의 하수처리장 방류수 이용

熊本市의 有名海연안에 있는 농경지에서는 하천으로부터의 취수 가능량이 적어 항상 관개용수의 부족상태에 있었다. 이에 따라 토지 개량조합에서는 1976년에 熊本市에 대해 蓮台寺 하수처리장(현재는 中部정화센터로 개명)의 하수처리수의 공급을 요청하였다. 이에 熊本市의 농정당국에서는 하수처리수를 농경지 관개용수로 이용했을 경우 발생할 문제점에 대해 수년에 걸친 시험재배를 반복하여 검토한 결과 하수처리수를 혼합하여 사용하는 것으로 결정하였다. 벼농사 기간 중 中部정화센터의 방류수 일부가 수로를 통해 농업용수를 취수하는 하천인 平井川으로 방류되고 있다. 공급수량은 1일 32,000 m³이고, 공급받는 농경지의 면적은 2.25 km²이다.

(5) 足利市の 渡良瀬川에서의 농업용수로의 이용

關東平野 北縁에 위치한 足利市の 渡良瀬川에 연해 있는 농경지에서도 농업용수원이 별도로 없고 마을하수가 포함된 작은 하천수로부터의 불안정한 취수에 의존하여 벼농사를 행하고 있었다. 상류에는 주택단지가 개발되어 오염이 진행되었을 뿐만 아니라 인근에 하수처리장이 건설되는 것을 계기로 하여 토지개발조합에서 足利市에 대하여 하수처리수의 농업용수로서의 공급을 요청하게 되었다. 이에 따라 벼농사 기간 중에 한하여 渡良瀬川에 방류되는 하수처리수의 일부를 농업용수로에 공급하게 되었다.

2) 미국의 사례

미국에 있어서 하수처리장 처리수의 재이용은 수자원의 보호, 용수의 효과적인 이용 및 새로운 용수원 확보의 폐수의 토지처리 및 처분과 깊은 관련이 있다. 19세기에 하수도 관망 시스템이 계획된 이래, 도시하수는 농경지에서 사용되어 왔는데, 당시 농경지는 주로 폐기물의 처분지로 여겨졌다. 최근 들어 하수처리장의 처리수는, 농업용수로의 재이용과 관련한 사업이 수행되고 있다. 미국에서 최초로 재이용을 적용한 곳은 1926년 아리조나주에 있는 Grand Canyon National Park로서, 공원내에서 발생하는 오수를 처리하여 수세식 화장실의 세정용수, 잔디밭의 살수용수, 냉각용수 등으로 사용되었다.

(1) 캘리포니아주 산호세 소재의 Gangi

Brothers 업체는 식품공업의 조리 및 타 공정에서 배출되는 증기를 재이용하는 시스템을 도입하여 용수량을 56만 m³/일에서 21만m³/일로 감소시켰다. 로스엔젤레스 수자원 당국은 모든 물사용자들로 하여금 사용량을 1986년도의 10%이하로 절감시키는 계획을 수립하였으며, 최대 사용자인 Unocal Corp.의 Wilmington 공장에서는 Steam Turbine의 전기모터를 교체하고, RO 장치를 도입하여 물사용량을 21만 m³/일에서 2천 m³/일로 감소시켰다.

또한 California에서는 하수처리수를 냉각용수로 이용하는 경우가 많기 때문에 1993년에 Chervon Corp.의 Richimond 공장은 필요한 냉각용수의 절반을 하수처리수로 이용할 계획으로 2차 처리수를 침전, pH조정, 여과, 염소처리하여 공급하

는 시스템을 도입하였다.

Arizona의 사막지역에서는 Phoenix시 하수처리장의 2차 처리수를 살수여상, Gold Lime Soda Ash Process, 중력침전을 거쳐 Palo Verde Nuclear Power Plant의 냉각수로 보급하고 있다.

한편 폐수 및 자원의 재사용 사례로서는 Stone & Webster Engineering Corp.(SWEC)이 Canada의 제지공장에서 폐수 및 폐지를 재사용하는 시설을 설치하여 450 m³/일의 Fiber를 회수 사용하고 있으며 Texas Ethylen Complex에는 1135L/d의 함유 폐수를 재사용하는 시스템을 설치하였다.

미국은 국토가 넓기 때문에 부지를 크게 사용하는 Land Treatment의 이용도 많은데, Kentucky주 Russellville의 Logan Aluminum Inc.에서는 1992년 16ha에 달하는 Overland Flow-Wetland System을 설치하여 재이용뿐 아니라 야생 동식물의 서식지를 마련해 주는 부차적인 효과도 거두고 있다.

(2) St. Petersburg의 Water Reuse Program

St. Petersburg는 인구 250,000명의 Florida주에서 네 번째로 큰 도시로서 1950 ~ 1970년 중반까지 급속히 성장하였고, 용수는 주로 인근 4개 도시로부터 공급을 받아 왔지만, 이후 물 공급상의 압박을 받게 되었고 이러한 국면을 타개하기 위해서 물수지를 맞추기 위한 노력을 지속적으로 실시해 왔다. St. Petersburg의 지역 현황은 지형학적으로는 반도상에 위치하여 삼면이 바다로 둘러싸여 있고, 수리학적으로 이 지역은 섬이기 때문에 물공급을 위한 큰 강이나 지하수원을 갖고 있지 못한 실정이다. 1900년경 생활용수로 이용하기 위해 개발된 우물은 인구 증가로 인해 양수량이 줄어들기 시작하였고, 1980년 중반에는 해수침투로 인해 지하수의 염분농도가 급격히 증가하게 되었다. 이에 따라 St. Petersburg에서는 새로운 수원지를 개발하기 위해 개인회사와 접촉하고, 회사는 인접 군의 부지를 구입하여 Wellfield를 개발하고 여기에 정수장을 건설하고, 도시 북부에 건설된 Water Repumping Station과 정수장 사이에 직경 90 cm, 길이 48 km의 급수관을 설치하였다. 1940년초 St. Petersburg는 Hernando County에 위치한 Weeki-Wachee Springs를 포함한 두 번째 미개발된 부지를 구입(회사의 입장에서는 장래에 비용가치가 있을 것으로 예상하고 수원으로 이용하기 위해 Springs의 부

지를 구매한 것임)하였는데 Springs는 St. Petersburg에서 97km(60mile) 떨어진 곳에 위치하고 있었다.

1960년초 미개발된 부지가 두 번째 Wellfield로 개발됨으로써, St. Petersburg는 세 개의 다른 County에 일련의 공급 시설을 소유하게 되었으나 이들 세 County에서도 자체 물수급에 위기감을 느끼게 되었다. 이런 가운데서 1960년 후반 세 번째 부지를 구매하여 Wellfield로 개발하였다. 1970년대초 인접 County에 네 번째 Wellfield를 개발하려고 시도하였으나 세 개의 County가 연합해서 관할 구역 내에서 개발저지 협약을 체결하게 되면서 물수급에 심각한 영향을 받게 되었다. St. Petersburg는 1970년대 초 두 가지 문제에 봉착하게 되었는데 하나는 추가적인 물이 필요했으나, 새로운 수원을 개발하기 위한 허가를 얻는 것이 불확실해졌고, 비용 및 환경적 측면에서 다른 County와 이미 관계가 악화될 가능성이 높아졌기 때문에 St. Petersburg시는 Weeki-Wachee의 개발을 선택사항으로 고려할 수가 없게 되었다. 또 다른 문제는 급속한 도시성장으로 인해 도시내 4개 하수처리장의 확장이 필요하게 되었는데, 이는 당시 Florida주에 의해 하수처리장 유출수에 대한 규제(즉 배출금지를 포함한 고도처리 실시)가 채택되었기 때문이었다.

따라서 Tampa Bay Area에 위치한 처리장 유출수는 3차처리 및 영양물질 제거를 위한 고도처리를 실시하게 되었다. Florida주는 물소비 활동이 잔디용 살수용수(Turf Irrigation)라는 점을 인식해서 특히 지하수위가 최저로 되는 건기동안 하수처리와 물공급 문제를 해결하기 위한 매우 혁신적이고 대담한 계획을 수립하여 추진하기로 결정하였다. 즉, 하수처리장을 3차 처리시설의 고도처리시설로 확장하되, 영양물질은 제거하지 않고, “Reclaimed Water” Pipe Network 또는 Secondary Line을 통해 상업 또는 레크레이션 지역의 관개용수로 고도처리된 처리수를 재이용하게 함으로써 표류수에 대한 배출을 용이하게 하는 계획을 수립하게 되었다.

(3) 남다호 공익사업조합

1950년대 초반에 네바다주와 캘리포니아주 남다호의 수질보전을 도모하기 위해서 예외적인 경우를 제외하고 남다호 내에 하수를 방류하지 못하게 하였다. 이

정책은 지역의 발전이 급속도로 진행된 기간 내에도 준수되었다. 1968년에 3차 처리 시설의 운전을 개시하여 남다호유역에서 알핀구로 처리수의 송수를 개시하였다. 처리수를 445.4 m의 높이, 22.5 km의 거리를 펌핑하고 여기서 20.9 km의 거리를 자연유하의 Pipe Line으로 송수하여 인디안 크리크 저수지로 송수하였다. 인디안 크리크 저수지의 용량은 3,937천 m³으로서 이 저수지의 물은 인체와 접촉되는 수영이 허용되고 낚시를 할 수 있는 레크레이션 호로 활용되고 있다.

(4) Sunday County 용수조합

이 사업은 레크레이션 호수를 위해 가정하수의 처리수를 이용하는 대표적인 사례로서 1961년이래 Sunday County에서는 처리한 하수처리수를 레크레이션 호수에 유입시키는데 따른 잠재적 건강장해에 관한 많은 연구자료가 축적되어 있고, 결과적으로 전염병에 대해서 건강상의 장해가 없음을 실증하고 있다. Sunday County에서는 현재 보트놀이나 낚시는 허용되어 있으나 전신이 잠기는 수영은 허용되지 않고 있다. 1965년에 선데이 호 근처 부지에 호수와는 분리되어 흐르는 물을 사용하는 풀장을 개설하였다. 이 풀장에서는 응집, 여과 및 염소 처리한 하수처리수를 사용하고 있다.

(5) Orange County

캘리포니아주 남부에 위치한 Orange County는 Orange County는 60% 이상의 물을 지하수원에 의존하고 있다. 양수량이 증가하면서 1956년에는 지하수위가 저하하여 해수 수위보다 낮아지게 되는 사태가 발생하였다. 이 때문에 해안과 접해 있는 지역에서는 지하수층에 해수가 침투함으로써 염분농도가 높아지고 이로 인해 이용 가능한 수원이 염분으로 인해 사용할 수 없게 되었다.

일반적으로 상류에서 침투량을 증가시키는 것이 당면 대책이 되겠지만, 해수의 침입에 대한 우려 때문에 해안을 따라 담수를 주입하여 수리학적 장벽을 만들어 해수의 침입을 방지하였다. 주입되는 원수로는 심정호수, 수입수, 해수의 담수화수, 하수처리장 방류수 4종류가 검토되었다. 해수의 담수화수와 하수처리장 방류수 중에 경제성 면에서 최종적으로 방류수가 선정되었다. 재이용 처리시설은 하수처리장 근처에 건설되어 있고 처리수(6만 m³/d)는 24개월 우물을 통해 지하에

주입되었다. 함양용수를 생산해 내는 고도처리시설을 “Water Factory 21” 이라고 명명하였으며, 1976년 10월부터 방류수를 재처리하기 시작하였다. Orange County가 함양용수로 하수처리장 방류수를 재처리하기로 결정한 이유는 매년 18,503천 m³(1일 50,690 m³)의 방류수가 바다로 무의미하게 방류되어 재이용할 수 있는 수자원이 낭비되고 있고, 방류수를 재처리하여 이용할 경우, 콜로라도강과 주정부에 의존하고 있는 용수량을 감소시킬 수 있고, 극단적인 가뭄이나 비상사태가 발생해 콜로라도강과 주정부로부터 공급받는 수량이 감소하게 될 경우, 해수침입 방지를 위한 인공함양사업에 차질을 가져올 수 있지만 하수처리장 방류수는 거의 일정하게 공급할 수 있으므로 그러한 위험성은 적다.

(6) 로스엔젤레스 시

로스엔젤레스 시에서는 1962년부터 지하수 충전 시스템(Ground Water Recharge System)을 대규모로 실시하고 있는데, 주로 염소살균 후 처리수를 살수지를 통해서 지하에 주입하고 있다. 살수지는 로스엔젤레스시를 관통하는 San Gabriel강, Rio Hond강의 2개 하천 근처에 설치되어 있는데 3개의 처리장 처리수를 홍수조정 수로에 흘러 보내어 상수용 수원인 지하수 층에 침투시키고 있다. 침투량은 3,000 m³/일 정도로서 약 280 ha의 살수지를 2 ~ 8 ha 정도의 블록으로 나누어 6일간 관수, 6일간 침투, 6일간의 건조기간을 합하여 18일을 주기로 주입하고 있다. 지하 주입시 수질적인 문제가 되는 것은 질소농도인데 질산성 질소의 농도가 지중에서 10 mg/L이하가 되도록 처리수를 개수로의 수입수로 3배 정도 희석시키고 있다. 지하수의 양수량은 연간 약 2.2억 m³ 정도로서 이중 7,400만 m³(전체의 1/3)은 표류수, 천층수 및 용출수 등의 지역수이고 나머지 1.5억 m³이 하수처리수와 수입수이다. 하수처리수의 지하 환원량은 연간 약 3,300만 m³로서 전체의 약 15%정도를 차지하고 있다.

Los Angeles 시 및 California주 전역의 재이용 시스템 중 독특한 것은 하수도관선의 적당한 위치에 재이용 처리시설을 설치하여 필요한 양의 하수를 양수하여 목적에 맞게 처리하고 처리과정에서 발생하는 오니는 하수도관선에 보내어 처분하는 방식을 채택하고 있다. 즉, 수질에는 차이가 있지만 하수도관선은 항상 일정 수량을 저류하고 있는 취수용 하천이라는 개념이다.

(7) 캔사스주 체누트

캔사스주 체누트 에서는 짧은 기간 동안 하수처리수를 생활용수로 직접 이용한 사례가 있는데, 1952년부터 걸쳐 약 6개월간 12,000명의 주민이 하수처리장의 방류수를 거의 직접 생활하수로 이용하였다. 평상시의 수원인 네오쇼와호가 1956년 여름에 거의 바닥을 드러냈기 때문에 2차 처리시설에서 염소 살균된 방류수를 하상의 저수지 뒤쪽에 집수하여 이용하게 되었다. 이 저수지의 체류일수는 거의 17일로서 이 물은 정수장에서 응집, 침전, 여과 및 살균을 거쳐 각 마을의 음료수로 공급되었다. 이 물은 음료수 기준에 적합하지 않은 것은 아니었으나, 청백색 및 황색을 띠고 불쾌한 냄새를 나타낼 뿐 아니라 거품이 많이 발생하고 또한 높은 염화물, 나트륨, 증발잔류물 및 유기물 함량을 포함하고 있었다. 이 지역에서는 공적인 다른 대체 수원이 빈약했기 때문에 약 70개소의 우물이 굴착되었으나, 대부분이 무기물 함량이 높은 것이었다.

(8) 아리조나주 그랜드 캐년

아리조나주 그랜드 캐년의 하수처리시설은 국립공원 당국에 의해 운전이 개시되어 비음용의 목적으로 공원에 공급되었다. 5월부터 9월까지 물이용이 많은 계절에는 평균 113,6 m³/d의 하수처리수를 수세식 화장실용수, 세차, 관개 및 건설용으로 사용하였는데, 이 양은 공원 내에서 사용하는 전체 물 사용량의 7%에 해당하였다. 처리 프로세스는 활성슬러지 처리를 거친 후 안트라사이트에 의한 여과와 염소처리가 적용되었고, 잔류염소 농도는 5 mg/L로 유지되었다. 그랜드캐년의 하수처리장은 자동화되어 있지 않았기 때문에 잔류염소 농도는 안전을 확보하기 위해 주된 수질항목으로 취급되고 있으며 상주직원이 24시간 감시하였다.

3) 유럽 및 기타지역의 사례

(1) 영국

영국 수도의 약 1/3은 하수처리수를 포함한 강에서 취수하고 있다. 강에 배출된 모든 하수가 1차, 2차, 혹은 3차 처리되기 때문에 이 강의 수질은 오타방지라는 점에서는 만족할 것이라고 생각되지만 이와 같은 상태는 명확히 가장 광대한

하수처리장 방류수재이용의 형식을 나타내는 것이다.

템즈강 유역은 약 9,760 km²이고, 런던지구 수도의 약 70%를 조달하고 있다. 이 강의 유량은 상당히 낮은 수치이며, 가령 Teddington에서는 80년간 평균 68.0 m³/s와 비교해 1934년에 7.4 m³/s를 기록하고 있다. 하류에 있어 하수처리수의 비율은 평균 유량의 경우 약 14%이다. 런던 수도 취수점에 있어 하수처리수의 비율은 붕소의 함유량에 의해 나타내고 있다. 일반용 합성세제는 표백제로서 과불산염을 상당히 함유하고 있고, 하수처리수중 평균 함유량은 약 1.5 mg/L가 되어 있다. 런던 수도 취수점에 있어 붕소의 평균 농도는 약 0.2 mg/L이지만, 붕소는 하천의 자정작용의 영향은 받지 않는다고 생각되기 때문에 하수처리수의 혼입율은 거의 13%가 된다.

재이용 형태에 따른 사례로는 다음과 같다.

가) 공업용수로서의 직접 재이용

㉠ 제철소의 재이용

Appleby-Frodingham 제철소는 철 1톤 생산하는 데에 물 200 m³ 이상을 필요로 하였지만 고도의 순환이용에 의해 철 1 m³당 물 5 m³로 감소했다. 소비한 물의 대부분은 대기 증으로 증발한다. 이 제철소의 주요한 급수원과 유량은 다음의 <표 2-53>과 같다. 나머지 28%는 공장배수와 공장에서 채취한 빗물이다. 하수처리수의 평균 사용량은 67 l/s이고, 이용률은 79%이다. 하수처리수의 수질과 다른 급수수질의 비교를 <표 2-54>에 나타냈다. Ancholme강의 물은 계절의 영향을 받아 염화물 농도는 보통 40 ~ 60 mg/L이지만, 건조계절이 오래 계속되면 하수처리수의 비율이 증가하여 1,200 ~ 1,500 mg/L가 된다. 또 Ashby Ville의 물은 오염물질(특히 세제)의 농도가 높지만 수질적으로는 안정되어 있다. 이 물은 용광로의 가스 세정 시스템의 보급수로 사용되고 있다.

㉡ 모직물 공업에 있어 하수처리수의 재이용

인구 약 4만의 Pudsey 거리는 요크셔의 모직물 공업지대이다. 큰 공장은 원료에서 최종 의류까지 일관 생산을 하는 경향이 있고, 이와 같은 공장에 있어 모든 물의 사용량은 약 13 l/s이다. 수자원은 3가지이지만, 장래 확장을 생각하면 불

충분하고, 하수처리수의 재이용이 제안되었다. 모직물 공업은 고급 수질의 물을 필요로 하지만 모직 공업 연구협회의 연구 결과, 탁도, 색, 현탁물질을 제외한 요구 수질에 적합한 것을 알았다. 하수처리장 내의 파일럿 플랜트를 설치하여 모래 여과와 염소 처리의 실험을 했을 때, 염색공장의 약 반수의 기계에까지 하수처리수를 사용할 수 있는 것을 알았다.

㉔ 하수처리수의 냉각 용수로의 재이용

영국에 있어 물의 최대 용도는 냉각용수이고 전 용수량이 2/3이상을 차지하고 있다. 또 냉각용수의 사용량으로는 발전소가 특히 많고, 석유정제소, 제철소, 제지공업 및 화학공업이 여기에 따르고 있다. 유기물의 침적을 방지하기 위해서는 마이크로 스트레이너, 슬라임의 발생을 억제하기 위해서는 염소처리(유리잔류염소 0.5 mg/L 이하), 또 스케일 방지를 위해서는 pH조정(7이하)가 필요할 것이다.

(2) 네덜란드

네덜란드 세계에서 인구 1인당 연간 유효 강우량이 적은 나라의 하나이다. 수원의 대부분은 라인강과 Meuse강에 의존하고 있지만, 이것들의 강은 인구 약 5,000만의 세계에서 가장 공업화한 지역의 하수가 유입되고, 오염되어 있다. 그렇기 때문에 신중하게 처리한 하수를 가정의 잡용수로 또한 궁극적으로는 음료수로 재이용하거나, 또 공장에 있어 물의 순환이용을 개선하거나 하는 연구가 계획되어 있다.

도시 하수와 공장 폐수의 간접적 재이용을 하는 경우 문제점을 조사하는 것과 함께 감시조작 등의 기술을 개발하기 위해 Dordrecht 시에서 파일럿 플랜트에 의한 실험을 개시했다. 이 플랜트에서는 Dordrecht시의 생물학적으로 처리된 하수를 탈염(역삼투)을 하는 경우와 하지 않는 경우의 2가지 처리 시스템에 따라 음료용수의 수질까지 정화된다. 역삼투를 포함한 시스템 방법은 규모 1.5 m³/hr 이고, 1978년 초부터 시운전이 개시되었지만 다른 시스템은 1979년 초에 전면적으로 운전이 들어갔다.

(3) 남아프리카에 있어서의 물의 순환이용

수원이 그다지 많지 않은 남아프리카에서는 도시 용수와 공업용수의 수요가 매년 7%증가하고 있고 금세기말에는 물부족이 될 것이다. 그렇기 때문에 하수의 재생이용은 수급 밸런스를 효과적으로 맞추기 위해 국가의 물 경제로서 연구하게 되었다. 하수 2차 처리수 혹은 3차 처리수의 농업 및 발전소 냉각 용수를 위한 재이용은 충분히 확립시키고 있지만 1956년에 규정된 법은 하수 처리수를 자연 수로에 배출하거나 재생수를 이용하기 위해 수질 수준을 만드는 것에 의해 재생 이용을 촉진시켰다. 결국 1977년에 규정된 새로운 보건법(위생법)은 전국에 있어 이것들의 기준 달성을 촉진하는 것에 큰 역할을 할 것이라고 생각된다.

시의 물 공급 시스템으로 물의 재생 이용을 한 유명한 예는 남서 아프리카의 Windlhoek시이다. 시에서는 물 수요의 증가와 수원이 부족하기 때문에 1960년대 후반에 물 부족 현상이 나타났지만 이미 1958년에는 Goreangab댐의 상류에 새로운 하수처리장을 또한 댐의 하류 수처리 플랜트를 만들어 물 관리 계획으로 하수 재이용을 받아들이고 있다. 하수처리수는 댐을 바이패스하여 수처리 플랜트로 보내진다. 1962년부터 1968년까지 시에서는 국립수연구소와 공동으로 물 재생 연구를 하고, 1968년에는 세계에서 최초로 급수 시스템의 일부로 재생 플랜트를 가동하게 되었다. 재생 처리 프로세스는 부상 분리, 포말 분리, 침전, 여과, 파괴점 염소처리, 2단식 활성탄 흡착 및 후염소 처리로 되어있지 시행개시후 2년간은 이 플랜트는 시의 모든 물 사용량의 13 ~ 14%를 조달하고 동시에 처리수 수질은 세계 보건 기구(WHO)의 음료수 기준으로 적합했다.

남아프리카에 있어 물 재생 이용의 중요성으로 인해 국립수연구소(NIWR)은, 하수 2차 처리수에서 음료수를 생산하기 위해 현존하는 물리 화학적 프로세스를 더욱 개선하는 개발을 계속하게 되었다. 그래서 Pretoria의 Daspoort 하수처리장 내의 규모, 4,500 m³/일의 Stander 물 재생 플랜트를 만들고, 1970년에 실증 플랜트로 운전을 개시했다. 원수는 Bio Filter Humus Tank 처리수와 활성슬러지 공법 처리수 2종류로 처리 프로세스는 현재 시점에서 석회 처리, 암모니아 회수, 재탄산화, 염소처리, 2단식 활성탄 흡착 및 후염소 처리이다.

(4) 이스라엘

천연수가 적은 이스라엘에 있어 중, 대도시의 하수는 적절하게 정화시킨 후 국가의 수도로 통합해야하는 유력한 수원이라고 생각되고 있다. 과거 10년간에 몇 개의 하수 재생 이용이 계획되었고 일부는 실시되었지만 그 안에서 최대 또한 가장 진보한 것은 텔아비브 수도권하수를 고도 처리한 후, 지하에 주입하여 재이용이라는 Dan 지역 프로젝트이다. 텔아비브 수도권은 1985년에는 인구 130만이었고, 1억 5,000만 m^3 /년 의 하수처리수가 나올 것으로 예상되었지만 그 처리수는 텔아비브의 남쪽에 있는 Rishon Lezion 지역에 있어 수평으로 된 모래 언덕 위에 간헐적으로 살수하여 지하 주입하였고, 거기에서 500 ~ 1,500 m 떨어진 지점에서 펌프로 국영수도관 안에 재생수를 양수로 하여 여러 가지를 한해에 사용할 계획으로 세웠다.

Dan 지역 하수 재생 프로젝트는 2단계로 나뉘어진다. 제1단계는 지역의 남부를 대상으로 하여 규모 1,500만 m^3 /년을 최종적(제2단계)으로는 2,000 ~ 3,000만 m^3 /년 재생 처리하도록 하였다.

(5) 사우디아라비아

사우디아라비아의 Riyadh에서는 가정 하수의 2차 처리수를 양질의 공업용 프로세스용수로 전환하는 규모 약 19,000 m^3 /일의 물 재이용 시스템 계획을 결정했다. 계획을 세울 때에는 세 가지 요구가 나와 있다. 그 첫째는 소방 용수, 냉각용 보급수 및 보일러 용수를 급수 대상으로 포함하는 경우가 있지만, 보일러 용수는 경도 0 mg/L, 전 용해성물질 10 mg/L이하, 암모니아와 COD 0 mg/L, 실리카 0 mg/L, 현탁물질 0.5 mg/L 이하의 고급 수질까지 처리해야 한다. 두 번째는 이 지역의 수원은 극히 한정되어있기 때문에 저수와 순환을 최고로 해야 한다. 또 세 번째는 전용해성 물질이 3,000 mg/L 이상의 2차 처리수에서 고급 수질의 물을 만드는 기술은 조작이 간단하고 신뢰도도 높은 동시에 또한 유지 관리비용을 최저로 해야 한다.

계획된 재생 이용 프로세스는 조목스크린, 포기조정지, 포기식 조여과기, 중간에 재탄산화(recarbonation)설비를 갖춘 2가지의 접촉침전지, 염소처리, pH조정, 클린 타워(Clean Tower), 폴리머 혼합, 중력식 복층여과기, 입상 활성탄 흡착탑, 2

개의 역삼투 장치 및 이온 교환기이다. 소방용수는 활성탄 처리와 염소 처리 후에 저류되고, 클린 타워의 보급수는 역삼투 1단 처리후 저류된다. 또 비용을 낮추기 위해 노폐탄을 재생하여 석탄 오니에서 칼슘을 회수하는 동시에 석탄 재생용 가스로에서 나오는 CO₂는 재탄산염화에 사용한다.

(6) 인도

인도에서는 수자원 개발과 시의 물 공급 시스템이 인구 증가를 따라 공급되지 못하여 봄베이나 카르카타와 같은 대도시에서는 필요 수량의 반절은 급수되지 못하고 있는데다가 더구나 비가 적게 내리는 해에는 그것도 되지 않는 상황이다. 그렇기 때문에 물이 부족한 지역인 도시나 공장은 물의 재이용을 계획 혹은 실시하고 있는 지역이 많다.

봄베이는 지하수가 적고 관개수가 되어 지하수 의존이 불가능한 까닭에 특히 물의 재이용이 진보하고 있다. 1970년에 봄베이의 어떤 공장에서는 규모 5,000 m³/일의 하수 재생 처리 플랜트를 만들었고 원수인 하수는 플랜트에서 2.75 km 떨어진 지점에 있는 시의 하수구에서 펌프로 도수하였다. 처리 프로세스의 특징으로는 기온이 높고 (동계의 평균 기온 약 23°C) 큰 상공업 지대라는 것을 고려하여 냄새가 없는 호기처리를 확실하게 하기 위해 장시 포기를 이용한 점이고, 이것에 따라서 생하수의 BOD가 약 200 mg/L에 대해 침전 처리수의 BOD가 약 5 ~ 10 mg/L라는 낮은 수치를 항상 얻을 수 있었다.

모래 여과수의 일부는 연화 처리되고 일부는 바이패스하여 새로운 시의 물과 같이 섞은 후, 경도가 약 40mg/L가 되도록 하였다. 또 탈염전까지 처리 수량의 약 15%가 보일러로 급수하기 때문에 또한 탈염 장치로 보내진다. 처리에 관련된 수질은 <표 2-61>과 같다. 이 플랜트의 자본비는 원수도수비, 토지대를 포함하여 약 70만달러(1970년 가격)이지만 장래 1만 m³/일의 규모로 쉽게 확장할 수 있도록 설계하였다. 또 운전비는 연화 처리까지 1m³당 0.09달러(US)이다.

(7) 싱가포르

싱가포르는 640km²의 면적에 약 390만명(1999년)이 거주하고 있으며, 수자원의 부족으로 100여 년 전부터 말레이시아로부터 물을 수입해 사용하고 있었다. 인구

증가, 생활수준의 향상, 국제적인 금융·무역·휴양도시로의 성장 등으로 물 사용량이 1950년 142천 m³/일(인구 100만명)이었던 것이 2003년에는 1,400천 m³/일로 급격하게 증가하였다. 이러한 급격한 물수요증가에 대처하기 위한 방안으로 싱가포르 당국은 해수 담수화, 하수처리장 방류수 재이용 등의 시책을 추진해 오고 있으며, 싱가포르의 Public Utilities Board(PUB)와 Ministry of the Environment(ENV)에서는 1998년부터 “싱가포르 방류수 재처리연구” 프로젝트를 추진하였고, 이 연구결과에 의해 설치된 방류수 재처리시설을 “NEWater Factory”라고 부르고 있다. 이 연구의 목적은 Bedok 및 Kranji 하수처리장에서 배출되는 방류수를 재처리하여 저수지의 물과 혼합해 음용수의 원수로 사용하는 데 있다. 또한 Public Utilities Board(PUB)에서는 웨이퍼 조립공장 등에서 비음용 공업용수로 사용하기 위한 재처리수를 생산해 내기 위해 Bedok 및 Kranji 하수처리장에 1일 72,000 m³ 생산능력을 갖춘 “NEWater Factory”를 2001년 11월에 준공하고, 2003년 웨이퍼 조립단지를 비롯하여 Woodlands에 재처리수를 공급하고 있다.

(8) 오스트레일리아

오스트레일리아가 지구상에서 가장 건조한 대륙인 것은 잘 알고 있지만 오스트레일리아의 하천이 어떤 지역에서는 장기간 유량이 없는 일이 보통인 것과 같이 유량에 크게 변화를 나타낸다는 것과 같은 것은 일반적으로 그다지 알려져 있지 않다. 수자원 개발은 영국의 이민이 시작된 이래 200년간에 몇 개의 지표수원의 개발이 진행되어 온 것이지만, 물의 재이용에 대해서도 관심이 있고, 현재 다음과 같은 프로젝트가 있다.

- 1897년 이래 Victoria의 Werribee 농장에서는 메르폴린의 하수를 소와 양을 위한 목장의 관개로 사용하고 있다.
- 남부 오스트레일리아의 시골 거리에 있는 운동장의 관개를 위해 물 재이용
- 남부 오스트레일리아에 있어 환경 용수
- 남부 오스트레일리아에 있어 포도주용 포도생산에 이용된 포도원 관개 이외의 조사, 연구도 증가해 왔지만 그 안에서는 야채의 생육, 목재의 생육, 바이러스를 포함한 위생관계 등을 연구하고 있는 Victoria의 재생수에 위원회의 연구가 특히 주목되고 있다.

II. 각국의 농업용수 수질기준 및 하수처리수 재이용 권고기준

Table. 2 각국의 농업용수 수질기준³⁴⁾

| Parameter | 단위 | 캐나다 | 미국 | 대만 | 헝가리 | 중국 | | | 사우디아라비아 | 튀니지 |
|--------------------------|------|----------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | | | | | 논 | 밭 | 야채밭 | | |
| pH | | | | 6.0-9.0 | 6.5-8.5 | 5.5-8.5 | 5.5-8.5 | 5.5-8.5 | 6.0-8.4 | 6.5-8.5 |
| TDS | g/L | 0.5-3.5 | | | | 1-2 | 1-2 | 1-2 | | |
| Electric conductivity | dS/m | | | 0.75 | | | | | | 0.7 |
| SS | mg/L | | | 100 | | 150 | 200 | 100 | 10 | 30 |
| Chloride | mg/L | | | 175 | | 250 | | 250 | 280 | 2000 |
| Sulfate | mg/L | | | 200 | | | | | | |
| TKN | mg/L | | | 1 | | 12 | 30 | 30 | | |
| BOD | mg/L | | | | 80 | 150 | 80 | 10 | | |
| COD | mg/L | | | | | 200 | 300 | 150 | | 90 |
| 온도 | ℃ | | | 35 | | 35 | 35 | 35 | | |
| Al | µg/L | | 5000 | 5000 | 5000 | | | | 5000 | |
| As | µg/L | 100 | 100 | 1000 | 200 | 50 | 100 | 50 | 100 | 100 |
| Ba | µg/L | | | | 40000 | | | | | |
| B(total) | mg/L | 0.5-0.6 | 0.75 | 0.75 | 0.7 | 1-3 | 1-3 | 1-3 | 0.5 | 3 |
| Cd | µg/L | 10 | 10 | 10 | 20 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 |
| Cr(total) | µg/L | 100 | 100 | 100 | 50000 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Co | µg/L | 50 | 50 | 50 | 50 | | | | 50 | 100 |
| Cu | µg/L | 200-1000 | 200 | 200 | 2000 | 1000 | 1000 | 1000 | 400 | 500 |
| F(total) | mg/L | 1 | | | 1 | 2-3 | 2-3 | 2-3 | 2 | 3 |
| Fe | µg/L | | | | 100 | | | | 5000 | 5000 |
| Pb | µg/L | 200 | 5000 | 100 | 1000 | 100 | 100 | 100 | 100 | 1000 |
| Li | µg/L | | 2500 | 2500 | 2500 | | | | 70 | |
| Mn | µg/L | | 200 | 2000 | 5000 | | | | 200 | 500 |
| Hg | µg/L | | | 5 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Mo | µg/L | 10-50 | 10 | 10 | | | | | 100 | |
| Ni | µg/L | 200 | 200 | 500 | 1000 | | | | 20 | 200 |
| Se | µg/L | 20-50 | 20 | 20 | | 20 | 20 | 20 | 20 | 50 |
| Ag | µg/L | | | | 100 | | | | | |
| V | µg/L | 100 | 100 | 10000 | 5000 | | | | | |
| Zn | mg/L | 1-5 | 2 | 2 | 5 | 2 | 2 | 2 | 4 | 2 |
| Cyanide(total) | µg/L | | | | 10000 | 500 | 500 | 500 | 50 | |
| Surfactant(ABS) | µg/L | | | 5000 | 50000 | 5000 | 3000 | 5000 | | |
| Oil, grease | µg/L | | | 5000 | 8000 | | | | absent | |
| Benzene | µg/L | | | | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | | |
| Tar | µg/L | | | | 30000 | | | | | |
| Petroleum | µg/L | | | | 500 | 1000 | 500 | 500 | | |
| Methanol | µg/L | | | | 100 | | | | | |
| trichloroacetyl aldehyde | µg/L | | | | | 1000 | 500 | 500 | | |
| Propionaldehyde | µg/L | | | | | 500 | 500 | 500 | | |
| Phenol | µg/L | | | | | | | | 2000 | |

Table. 3 하수처리수 재이용수질 권고기준³⁾

| 수질항목 | 청소용수 ¹⁾ | 조경용수 ²⁾ | 유지용수 ³⁾ | 친수용수 ⁴⁾ | 농업용수 ⁵⁾ | 공업용수 ⁶⁾ |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| pH | 5.8 ~ 8.5 | 5.8 ~ 8.5 | 5.8 ~ 8.5 | 5.8 ~ 8.5 | 6.0 ~ 8.5 | 6.5 ~ 8.5 |
| SS(mg/L) | | | | 6이하 | | 10이하 |
| BOD(mg/L) | 10이하 | 10이하 | 10이하 | 3이하 | 8이하 | 6이하 |
| COD(mg/L) | 20이하 | 20이하 | | | | |
| DO(mg/L) | | | 2이상 | 2이상 | 2이상 | |
| 탁도(NTU) | 2이하 | 2이하 | | | | 10이하 |
| 잔류염소(mg/L) ⁷⁾ | 0.2이상 | - | | | | |
| 냄새 | 불쾌하지않음 | 불쾌하지않음 | 불쾌하지않음 | 불쾌하지않음 | | |
| 색도(도) | 20이하 | 20이하 | 40이하 | 10이하 | | |
| 외관 | 불쾌하지않음 | 불쾌하지않음 | | | | |
| Cl(mg/L) | | 250이하 | | | 250이하 | |
| T-N(mg/L) ⁸⁾ | | | 10이하 | 10이하 | | |
| T-P(mg/L) ⁸⁾ | | | 1이하 | 1이하 | | |
| Al(mg/L) | | | | | 5이하 | |
| As(mg/L) | | | | | 0.05이하 | |
| B-total(mg/L) | | | | | 0.75이하 | |
| Cd(mg/L) | | | | | 0.01이하 | |
| Cr ⁺⁶ (mg/L) | | | | | 0.05이하 | |
| Co(mg/L) | | | | | 0.05이하 | |
| Cu(mg/L) | | | | | 0.2이하 | |
| Pb(mg/L) | | | | | 0.1이하 | |
| Li(mg/L) | | | | | 2.5이하 | |
| Mn(mg/L) | | | | | 0.2이하 | |
| Hg(mg/L) | | | | | 0.001이하 | |
| Ni(mg/L) | | | | | 0.2이하 | |
| Se(mg/L) | | | | | 0.02이하 | |
| Zn(mg/L) | | | | | 2이하 | |
| ABS(mg/L) | | | 1.0 | 1.0 | 0.5이하 | |
| CN(mg/L) | | | | | 불검출 | |
| PCB(mg/L) | | | | | 불검출 | |
| 총대장균군 (개/100mL) | 불검출 | 불검출 | 1,000이하 | 불검출 | 200이하 | 1,000이하 |

○ 하수처리시설 방류수수질기준 설정 항목 : 기본적으로 방류수기준을 만족해야 함

○ 방류수기준보다 강화 또는 추가되는 항목 : 아래의 재이용 수질권고기준을 적용
 주 1. 청소·세차용수, 수세식 화장실 변기 세척용수, 도로청소용 살수용수와 이와 유사한 용도에 적용

2. 연못, 가로수, 공원 및 골프코스과 이와 유사한 용도로 사용되는 경우에 적용
 3. 하천의 건천화에 따른 유지용수 공급 및 하천기능 유지, 낚시, 물놀이 등 레크리에이션 활동 가능
 4. 수영 등 인체에 직접 접촉 가능한 경우에 적용
 5. 논 농사용 관개용수로 이용하는 경우에 적용. 밭농사, 화훼용수 등은 수요처와 별도 협의하여 결정
 6. 산업용 냉각용수로 이용하는 경우에 적용. 다회 순환 냉각수, 공정수, 보일러용수 등은 수요처와 협의 결정
 7. 염소 소독하는 경우에만 적용
 8. 하수처리장 방류수수질기준과 같이 겨울철(12월 ~ 3월)에는 T-N 60 mg/L, T-P 8 mg/L을 적용
- ※ 재이용 수질권고기준은 하수처리장에서 최종 처리하여 송수하는 수질에 대하여 적용함



감사의 글

불연듯 석사, 박사과정이었던 선배님들의 말씀이 생각납니다. ‘뭘놈의 시간이 이리도 빨리 지나감시냐? 벌써 졸업이여,’ 어느덧 2년이라는 시간이 소리소문없이 흘렀고, 흘러간 시간만큼이나 많은 추억과 아쉬움이 남습니다. 시간에 쫓겨 밤을 세면서 실험과 자료를 정리하던 어느날 밤, 작은 결실을 얻을 때마다 느꼈던 그 환희. 이 모든 것들이 지금도 생생합니다. 지금 생각하면 이 모든 것들이 주위 분들의 격려와 조언 그리고 질책이 아니었다면 가능했을까? 라는 의문이 들더군요. 이에 지면을 빌어 감사의 마음을 전합니다.

본 논문이 완성되기까지 끊임없는 가르침과 격려를 아끼지 않으신 이용두 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 세심한 검토로 부족한 논문을 완성해주신 감상규 교수님과 이기호 교수님께 감사의 마음을 전합니다. 그리고 6년의 긴 시간 동안 많은 가르침을 주신 허철구 교수님과 허목 교수님, 미국에 계신 조은일 교수님께도 감사드립니다.

학부과정에서는 다른 시작을 했지만 2년이라는 결코 짧지 않은 시간을 같이 지낸 강봉권, 박선영, 이해영 학형과 실험실 선배님이신 고창성, 고인범, 김현희, 현승규, 송희경, 신우석, 홍성민, 고득영 선배님, 상하수도 실험실의 분위기 메이커이고 논문 준비에 여념이 없는 문세미, 유경봉 학형, 실험실이라는 울타리 안에서 묵묵히 맡은 바 일을 해준 강정훈, 진성운, 한상운 후배님들에게도 고마움과 감사함을 전합니다. 많은 격려와 충고를 아끼지 않으신 강진영, 강기봉, 강경호, 고경필, 고영민, 김대준, 김정하, 김정훈, 김병현, 김현석, 송승혁, 양재호, 오테권, 전시범, 지상일 선배님들과 김경연 조교선생님 그리고 직장과 학업을 병행하시며 항상 후배를 먼저 챙겨주신 김길성, 김형철 선배님과 학교에 있는 98학원 동기인 김현정, 백동명, 이수미 학형, 부산수질연구소의 김상구 박사님, 어려운 부탁에도 항상 웃음으로 반갑게 맞이해주시는 고승희 선생님에게도 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 이외에도 친구란 이름으로 곁에 있어준 초·중학교, 고등학교, 대학교 친구들과 태권도동아리 수박희 선배님, 후배님들에게도 고마움을 전하고 싶

습니다. 그리고 논문의 시작과 끝을 함께 해주신 김창영 교수님과 김상현 선생님, 제주지역환경기술센터, (주)성신엔지니어링 관계자 여러분들에게도 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

끝으로 언제나 든든한 후원자로 항상 지켜봐 주시는 부모님과 누나인 박진현님, '이젠 제가 큰아들 노릇하겠습니다' 하며 덩씩 누나를 데리고 간 매형 김형택님, 사랑하는 조카 나연이와 민주, 바쁘다는 핑계로 무관심했던 동생 혜현이에게 이 작은 결실을 드립니다.

