[UCI]I804:24011-200000233279

2006年 2月

博士學位論文

下水處理水의 3次處理에 關한 研究

朝鮮大學校 大學院

環境生命工學科

白 桂 辰

下水處理水의 3次處理에 關한 研究

A Study on the Tertiary Treatment of Sewage Effluent

2006年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

環境生命工學科

白 桂 辰

下水處理水의 3次處理에 關한 研究

指導教授　申　大　允

이 論文을 工學博士學位 申請論文으로 提出함.

2005年 10月 20日

朝鮮大學校 大學院

環境生命工學科

白　桂　辰

白桂辰의 工學博士學位論文을 認准함

委員長　全南大學校　教授　李　庚　焄　印

委　員　朝鮮大學校　教授　崔　炯　一　印

委　員　朝鮮大學校　教授　鄭　京　勳　印

委　員　國立環境科學院　研究官　朴　善　求　印

委　員　朝鮮大學校　教授　申　大　允　印

2005年 12月 23日

朝鮮大學校 大學院

목 차

List of Figures ····· iv

List of Tables ····· vii

Abstract ····· ix

제1장 서론 ····· 1

제1절 연구개요 ····· 1

제2절 연구목적 및 필요성 ····· 3

제3절 연구의 범위 및 내용 ····· 4

제2장 이론적 고찰 ····· 5

제1절 응집 ····· 5

1. 응집의 원리 ····· 5

2. 공정별 분류 ····· 7

3. 응집공정 특성 ····· 9

제2절 흡착공정 ····· 14

1. 개요 ····· 14

2. 흡착평형 ····· 15

3. 흡착속도 ····· 15

4. 표적화방법 ····· 17

제3절 막분리 공정 ····· 18

1. 막분리 개요 ····· 18

2. 정밀여과 ····· 19

3. 한외여과 ····· 20
4. 막오염 ····· 20
제4절 분자량 분포(Molecular weight distribution) ····· 26
제5절 하수처리수의 이용 ····· 27
1. 광주지역 하수처리장 시설현황 ····· 27
2. 중수 수질기준 ····· 29
3. 하수처리수의 이용 사례 ····· 34
제3장 실험 및 장치 ····· 46
제1절 수질조사 ····· 46
1. 수질측정 ····· 46
2. 분석방법 ····· 46
3. 조류의 채집 및 분석 ····· 48
4. 공정별 실험 ····· 49
제2절 실험 및 재료 ····· 50
1. 응집실험 ····· 50
2. 흡착실험 ····· 51
3. 막분리 실험 ····· 52
제3절 실험장치 ····· 53
제4장 결과 및 고찰 ····· 55
제1절 하수처리장 유입수와 방류수의 수질 ····· 55
1. 유입수의 수질 ····· 55
2. 방류수의 수질 ····· 56
3. 유기물, SS 및 영양염류의 처리효율 ····· 63
4. 수질의 계절별 특성 ····· 65
5. 수질의 시간대별 특성 ····· 65
6. 조류조사 ····· 69

제2절 중수 목표수질기준 설정 ····· 75
제3절 응집공정 ····· 76
1. 응집제의 투입량에 따른 처리효율 비교 ····· 76
2. pH에 따른 처리효율 비교 ····· 85
제4절 흡착공정 ····· 88
1. 흡착평형 ····· 88
2. 분자량 분포 ····· 90
제5절 막분리공정 ····· 92
1. 막 세척 ····· 92
2. 막 오염 제어 ····· 94
제6절 연속처리공정 ····· 102
1. 응집/흡착/막분리 공정 ····· 102
2. 분자량 분포 ····· 105
3. 최종처리수의 수질조사 ····· 108
제7절 중수 이용 방안 ····· 110
제5장 결론 ····· 114
참고문헌 ····· 116
Appendix ····· 120

List of Figures

Fig. 1. Systematic diagram of sewage water treatment in Gwangju ····· 29
Fig. 2. High performance liquid chromatography system(SEC) ····· 48
Fig. 3. Jar-tester for coagulation process ····· 51
Fig. 4. Experimental apparatus of small scale coagulation/adsorption/membrane ····· 54
Fig. 5. Monthly variation of water quality in 2nd treatment plant ····· 56
Fig. 6. Monthly variation of BOD, COD in 2nd treatment plant ····· 58
Fig. 7. Monthly variation of color in 2nd treatment plant ····· 59
Fig. 8. Monthly variation of turbidity in 2nd treatment plant ····· 60
Fig. 9. Monthly variation of Fe and Mn in 2nd treatment plant ····· 61
Fig. 10. Monthly variation of Cl^- and hardness in 2nd treatment plant ····· 62
Fig. 11. Monthly variation of conductivity in 2nd treatment plant ····· 62
Fig. 12. Treatment efficiencies of BOD, COD, and SS in sewage treatment plant ····· 64
Fig. 13. Treatment efficiencies of T-N and T-P in sewage treatment plant ····· 65
Fig. 14. Hourly variation of concentratin in sewage influent ····· 68
Fig. 15. Hourly variation of concentration in sewage effluent ····· 68
Fig. 16. Effect of coagulant on the removal of turbidity ····· 78
Fig. 17. Effect of Alum on the removal of dissolved color ····· 79
Fig. 18. Effect of PAC on the removal of dissolved color ····· 80
Fig. 19. Variation of pH according to coagulant dosage ····· 81
Fig. 20. Effect of coagulants on the removal of dissolved organic carbon ····· 82
Fig. 21. Effect of coagulants on the removal of total phosphorus ····· 83
Fig. 22. Effect of coagulants on the removal of dissolved phosphorus ····· 84
Fig. 23. Effect of pH on the removal of turbidity ····· 86
Fig. 24. Effect of pH on the removal of dissolved color ····· 86

Fig. 25. Effect of pH on the removal of dissolved phosphorus ····· 87
Fig. 26. Effect of pH on the removal of UV-254 ····· 87
Fig. 27. Adsorption isotherm of DOC for two adsorbents ····· 89
Fig. 28. Adsorption isotherm of TOC and Color for two adsorbents ····· 89
Fig. 29. RMW distribution of TOC after PAC treatment according to the dilution amount of sewage effluent ····· 92
Fig. 30. Variation of relative pressure in the initially used membrane module ····· 93
Fig. 31. Variation of relative pressure after cleaning by chemocals ····· 94
Fig. 32. Variation of relative pressure vs. pH on MF membrane process ····· 96
Fig. 33. Variation of flux vs. pH on MF membrane process ····· 96
Fig. 34. Variation of pressure according to PAC dose on MF membrane process ····· 98
Fig. 35. Variation of flux according to PAC dose on MF membrane process ····· 98
Fig. 36. Variation of filtration pressure according to PAC dose and pH on MF membrane process ····· 99
Fig. 37. Variation of flux according to PAC dose and pH on MF membrane process ····· 100
Fig. 38. Variation of pressure according to $CaCl_2$ dose on MF process ····· 101
Fig. 39. Variation of flux according to $CaCl_2$ dose on MF membrane process ····· 102
Fig. 40. Schematic diagram of coagulation/adsorption/membrane hybrid system ····· 103
Fig. 41. Variation of pressure according several processes ····· 104
Fig. 42. Removal rates of color, turbidity and TOC on MF membrane process ····· 104

Fig. 43. Calibration of molecular weight and retention time ····· 105
Fig. 44. Variation of molecular weight distribution according to processes ····· 107
Fig. 45. Variation of molecular weight distribution according to the time passed after membrane treatment ····· 108

List of Tables

Table 1. Optimum pH for enhanced coagulation according to alkalinity ····· 13
Table 2. Point of diminishing returns for coagulant ····· 13
Table 3. Membrane properties for filtration processes ····· 19
Table 4. Wastewater treatment facilities in Gwangju sewage plants ····· 28
Table 5. The Criteria of reuse water according to drinking water's law ····· 30
Table 6. The Criteria of reuse water in Japan ····· 31
Table 7. The Criteria of reuse water according to departments in Japan ····· 31
Table 8. The Criteria of reuse water according to the usage in Japan ····· 32
Table 9. The Criteria of reuse water in USA EPA ····· 33
Table 10. Present conditions for the reuse of sewage water in Korea ····· 34
Table 11. Present conditions for the reuse of sewage water according to the usage in Korea ····· 35
Table 12. Present conditions of water usage facilities in Gwangju ····· 36
Table 13. Water quality of treated sewage water in INI steel company of Incheon ····· 39
Table 14. Water quality of sewage treated water according to cities in Japan ····· 42
Table 15. Analytical methods for searching water quality of sewage water ·· 47
Table 16. Physical properties of PAC ····· 52
Table 17. Microfiltration membrane properties used in this study ····· 52
Table 18. Water quality of sewage influent in 2nd stage of Gwangju I plant ··· 55
Table 19. Water quality of sewage effluent in 2nd treatment plant of Gwangju ·· 57
Table 20. Hourly variation of items of influent and effluent in 2nd treatment plant of Gwangju ···· 67
Table 21. Microbial and algal species appeared at 1st and 2nd investigation ··· 71
Table 22. Microbial and algal species appeared at 3rd and 4th investigation ··· 72
Table 23. Target standards estimated for the reuse water ····· 75
Table 24. Target standards estimated for the purpose of usage of reuse water 76

Table 25. Variation of RMW and polydispersivity by PAC treatment ····· 90
Table 26. Variation of Zeta potential(mV) according to PAC and $CaCl_2$ dosage ····· 100
Table 27. Variation of RMW and polydispersivity according to processes ··· 106
Table 28. Water quality of finally treated by coagulation/adsorption/ membrane ····· 109
Table 29. Requirement cost for the secondary treatment facility of 50,000㎥/day ···· 111
Table 30. Operating cost for the secondary treatment facility of 50,000㎥/day ·· 112

ABSTRACT

A Study on the Tertiary Treatment of Sewage Effluent

Paik, Ke-Jin
Advisor : prof. Shin, Dae-Yewn, Ph. D.
Department of Environmental Bioengineering,
Graduate school of Chosun University

This study was performed to search the appropriate processes for the water reuse from sewage effluent in Gwangju metropolitan city.

Water quality in influent and effluent of Gwangju sewage plant Ⅰ stage 2 was investigated from January to December 2004. Concentrations of the average BOD_5, COD, SS, T-N and T-P in sewage influent were 172.1 ㎎/L, 111.1 ㎎/L, 235.2 ㎎/L, 37.765 ㎎/L and 5.028 ㎎/L, respectively, in 2004. Concentrations of suspended solids and organic carbon were generally high during March to August in a year. Concentrations of the average BOD_5, and COD in effluent were 3.8 ㎎/L and 9.4 ㎎/L and removal rates of BOD_5, COD, SS, T-N, T-P, PO_4-P, and NH_3-N in effluent, treated by biologically from influent, 97.8%, 91.5%, 98.8%, 63.6%, 47.9%, 47.3%, and 47.5% respectively. The average concentrations of color, turbidity, Fe, Mn, pH, Cl^-, hardness, and conductivity were 26 degree, 0.8 NTU, 0.030 ㎎/L, 0.040 ㎎/L, 7.1, 83 ㎎/L, 78 ㎎/L, 595 ㎲/

㎝, respectively, and harmful heavy metals as Hg, As, Pb, Cd, Cr were not nearly detected. Algal species investigated in the secondary treated sewage effluent was totally 45 species during 2003 to 2004 and the organism appeared during summer season was 38 species including Cyanophyceae 5, Bacillatiophyceae 7, Chlorophyseae 14, Euglenophyceae 3, Protozoan 3, and et al.

Poly aluminium chloride (PAC) showed the optimal coagulant, with effective dose of 80㎎/L, in treating sewage effluent and followed by Alum with 100㎎/L in the range of 0 ~ 350 ㎎/L and ferric chloride was not the proper coagulant because water quality of the effluent was not bad compare to contaminated stream water. The treatment efficiencies of color, total phosphorus, and total organic carbon(TOC) were proportionally increased with coagulant dose of Alum and PAC up to 300㎎/L and 350㎎/L, in which the treatment rate of color were 60% and 66%, each. The removal rates of total phosphorus(T-P) were 90% and 92% when Alum and PAC dose of 100㎎/L were used at each system and the optimal pH was 5.0~7.0 in coagulation process.

Two kinds of adsorbents as PWWL, coal base, and PWPL, coconut base, were used to execute adsorption isotherm experiment by checking the removal rate of TOC. There was some discrepancy between the data and the theoretical result in predicting data using ideal adsorbed solution theory (IAST) and Freundlich isotherm.

By using 0.4% NaOCl, 4% NaOH, 1% HCl solution, membrane cleaning was performed according to the solution's properties. Powdered activated carbon(PAC) and calcium chloride were used to avoid membrane fouling.

The membrane life time was prolonged 10 and 30 times after treating coagulation and coagulation/adsorption each and it was also longer, when pH was 10 of alkali state, than acidic treated situation, because zeta potential reached to around zero.

After treating coagulation and membrane, weight average molecular weight was decreased from 950Da to 465 and 396Da. This suggests that materials over 400Da were easily removed by coagulation and adsorption. However, some materials under 400Da were not nearly removed by the two processes. That means natural organic matter(NOM), not removed, can affect to the formation of harmful disinfectant byproducts(DBPs) after Cl_2 treatment. Using this hybrid system, it can be possible to use the sewage effluent for water reuse after solving the problem of nitrogen and microbial.

Key words : Advanced treatment, Coagulation, Adsorption, Microfiltration, NOM(natural organic matter)

제1장 서 론

제1절 연구개요

세계 인구의 20%는 안전한 음용수를 공급받지 못하고, 약 50%는 안전한 위생시설(상하수도)의 혜택을 받지 못하고 있는 실정이다. 이용가능한 수자원이 줄어들고 지하수위가 점점 낮아져서 지역적으로 심각한 물 부족 현상이 도처에서 발생되고 있다.

우리나라에서도 인구증가, 산업화 및 생활수준 향상 등의 요인으로 용수사용량이 증가함에 따라 생활하수 및 산업폐수의 발생량이 증가되고 지방자치단체마다 환경기초시설을 설치하여 운영하고 있으나, 처리되지 않은 물질 및 비점오염물질 등이 유출되어 하천의 자정용량을 초과함으로써 수질목표를 달성하지 못하고 있다. 이와 같이 오염된 하천을 정화하고 증가하는 용수 수요에 대처하기 위해서는 오염부하량을 삭감하는 기술 개발과 새로운 수원을 확보하기 위한 대안의 모색이 절실하다.

UN의 국제인구행동연구소에서는 1인당 연중 이용가능한 수자원을 기준으로 1,000㎥이하이면 물 기근국가, 1,000~1,700㎥이면 물 부족국가, 1,700㎥이상인 국가는 물 풍요국가로 분류하고 있다. 이 기준에 의하면 우리나라의 1인당 사용 가능량은 1,550㎥로서 물 부족국가에 해당되며, 유엔환경계획(UNEP)이 발간한 '지구 환경전망 2000'이라는 보고서에서도 한국은 물 부족 국가로 분류되고 있다.

우리나라의 연 강수량은 1,274mm로서 세계평균인 974mm보다 많지만 인구밀도가 높기 때문에 1인당 평균 사용량 2,755㎥은 세계평균값 22,096㎥의 12.5%에 불과하다. 더구나 여름철에 강수량이 집중되어 계절적 편차가 크고 하천의 유량변동이 매우 크기 때문에 수자원 관리에 불리하다. 즉, 홍수기인 6~9월의 장마와 태풍기간에 연 강수량의 2/3가 내리고, 갈수기인 11월부터 익년 4월까지 6개월 동안의 강수량은 연 강수량의 1/5에 불과하다. 또한, 국토의 65%가 산악지역이고, 토양 표토층이 얇아 유역의 보수능력이 적고, 하천의 경사가 급하여 홍수 시 일시에 유출되

고 갈수기에는 유출량이 적으며 유량변동계수(최대유량과 최소유량의 비)가 300~400정도로서 선진국들에 비해 10배 이상 높다.

건설교통부에서는 우리나라의 용수부족량이 2006년에는 4억톤, 2011년에는 18억톤 정도라고 예측하였다. 이에 따라 정부나 자치단체에서는 수도법 중의 중수 관련 법안을 2001년부터 개정하였고, 광주광역시에서도 2004. 1일부터 일정한 면적 이상 규모의 터미널, 공항 및 폐수배출량이 1,500ton/day 이상인 공장에 대해서 중수 설치를 의무화하였다.

중수 시설을 조기에 설치하도록 촉구하기 위해서는 활성화 대책을 수립하고, 중수의 사용목적에 부합되는 수질을 확보할 수 있는 적절한 처리공법이 제시되어야 한다. 중수 확보 방안에 대해서 학계나 지역사회에서는 빗물 이용, 먹는 물로 사용되지 않은 소형 저수지의 생활용수 사용, 하수처리장 방류수의 이용 등 다양한 방법을 제시하고 있다.

광주광역시 하수처리장은 광주하수처리장 및 송대하수처리장 등 2곳이며 처리용량은 720천ton/day이다. 처리수의 대부분이 영산강 수계로 방류되고 있으며, 일부분을 광주광역시 환경시설공단에서 2003년부터 광주천 상류로 펌핑하여 하천유지용수로 이용하고 있다.

환경부에서는 2002년 11월부터 전국 4대강의 수질을 보전하기 위하여 수계오염총량관리지침을 수립하여 2004년 3월부터 시행하고 있다. 이 지침에 따라 설정된 영산강 수계의 목표수질기준을 달성하기 위해서는 현재 방류하고 있는 하수처리장 방류수의 개선이 불가피하며, 이를 위한 적절한 대책이 시급히 수립되어야 한다.

그러나 하수처리장 방류수를 3차 처리할 경우 바로 수계에 방류하는 것보다는 중수로서 대단위 주거단지 및 신규 택지건설 지구의 용수로 이용함으로써 수자원을 절약하고, 동시에 광주광역시 수돗물의 안정적 공급에 크게 기여할 것으로 전망된다.

하수처리장 방류수를 3차 처리하여 중수로 이용하기 위해서는 처리되지 않고 남아있는 현탁성 고형물질, 유기물, 영양염류, 중금속, 색·탁도 물질 및 이취물질 등을 중수 이용 목적에 적합하게 제거하기 위한 처리 공법이 개발되어야 한다.

수중의 불순물을 화학적으로 처리하지 않고, 간단히 물리적으로 처리하는 정밀여과(micro filtration, MF), 한외여과(ultrafiltration, UF), 나노여과(nanofiltration, NF), 역삼투여과법(reverse osmosis, RO) 등 분리막을 이용하는 여과법이 개발되어 이용되어 왔다.

MF는 운전압력이 낮고 투과율이 높은 반면, 유기물 제거율이 20~30% 정도로 낮고 금속이온이 거의 제거되지 않으므로 처리수의 이용에는 한계가 있다(Vigneswaran, 1992, Clark, 1992, Vickers, 1993). UF는 운전압력이 높아지고 투과율이 다소 감소하지만 처리수 중에 아직도 제거해야할 불순물이 남아 있고, RO는 방류수 중의 여러 가지 불순물을 물리적으로 제거하여 고품질의 용수를 생산하는 유용한 방법(Tanghe, 1992, Bourbigot, 1993, Vigneswaran, 1996, Marianne, 2003)이지만. 운전압력이 높기 때문에 운전비용이 많이 들고 용수 생산량이 적다는 단점이 있다. NF는 RO만큼 불순물 제거율은 높지 않지만 저압운전이 가능하고 유기물 및 색도유발물질을 90~99%까지 제거할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 응집, 흡착 및 이온교환 등에 의한 중금속, 현탁성 고형물질, 고분자 유기물 및 영양염류 등의 제거효율이 높은 것에 착안하여 막분리 공정을 이와 같은 단위공정과 조합할 경우 막분리 공정의 단점을 극복할 수 있을 것으로 판단하고, 하수처리장 방류수를 3차 처리하여 중수로서 이용하는 방안을 검토하였다.

제2절 연구목적 및 필요성

본 연구에서는 광주광역시 하수처리장 2단계 시설의 방류수를 중수로 이용하는 방안을 모색하고자 한다.

이를 위해서 광주광역시 하수처리장 2단계 시설 방류수의 수질을 조사·평가하고 중수 이용의 선진사례들을 충분히 분석하여 광주광역시하수처리장의 방류수를 중수로 이용할 수 있는지 타당성을 조사하고, 이를 적정 처리하기에 적합한 공법을 조사·연구하기 위해 응집/흡착/막 공정 등 단위공정의 적용성을 연구하며, 처리효율 향상을 위한 복합공정 연구를 통해 고효율 연속처리공정의 단계적 개발과 처리효

율의 타당성을 조사하는데 그 목적이 있다.

응집, 흡착, 막 분리 등 단위공정의 연구는 지난 수십 년간 활발하게 이루어져 왔고 많은 결과가 축적되어 있으나 이들을 결합한 연속처리공정에 관한 연구는 아직 초기단계이다. 또한, 대단위의 하수처리장에 이러한 연속처리공정을 적용한 사례는 아직 미미하다. 이 연속처리공정들은 원수의 수질 및 목표수질에 따라 다양한 배열이 가능하며, 다양한 종류의 오염물질을 처리공정에 따라서 효과적으로 제거할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 각 단위공정별로 광주광역시 하수처리장 2단계시설 방류수를 처리하여 처리효율을 분석하고, 제거물질에 대한 실험적 결과를 도출하며 적절한 처리공정 조합으로 중수로서 이용이 가능한 목표수질을 설정하여 최적의 설계조건을 확보하는 것이 본 연구의 근본 취지이다.

그 결과를 토대로 장래에 현장 적용을 위한 파일롯 플랜트 연구를 실시하여 대단위 하수처리장 방류수의 이용을 위한 실용연구의 장을 열게 되고, 실제공정에 적용되어 생산된 중수는 차후 광주광역시 도시계획에 따른 하수처리장 인근의 문화도시, 대단위 아파트, 대형건물의 각종 용수 및 생태공원의 조경용수 등으로 활용이 가능해 수자원 확보에 큰 일익을 담당할 수 있을 것으로 판단된다.

제3절 연구의 범위 및 내용

본 연구대상은 광주광역시 하수처리장 2단계시설 방류수의 이용이며, 이를 위하여 2004년 1월부터 2004년 12월까지 매월 유입수 및 방류수의 수질을 분석하고, 시간별, 계절별 수질변화를 파악하였으며, 조류는 2004년부터 2005년 6월까지 조사하였다.

방류수에 대한 응집, 흡착 및 막분리 실험을 실시하고, 염소소독의 영향을 피하기 위하여 소독공정 이전에 채수하였다.

방류수의 처리실험은 응집공정, 흡착공정, 막분리 공정에 대해서 단위공정별로 처리효율을 조사한 후, 연속처리공정 실험의 처리효율을 조사하였다. 단위공정별 실험

의 응집공정은 쟈-시험(Jar-test)를 사용하여 실험하고, 흡착실험은 회분식 반응조를 이용하여 흡착평형실험을 실시하여 색도, 유기물 등의 처리효율을 조사하였으며, 막분리 실험은 MF막을 사용하여 막의 오염과 세척 등을 조사하였으며, 연속처리 실험은 흡착, 응집 및 막분리 공정이 조합된 연속처리장치를 사용하여 실험하였다.

제2장 이론적 고찰

제1절 응집

1. 응집의 원리

응집공정은 응집·혼화 및 침전공정으로 구성된다. 즉 급속혼화지에서 원수에 알칼리제를 주입하고 급속교반하면서 응집제를 가하면 불용성 콜로이드가 생성되며, 이후 플록형성지에서 완속교반하면서 고분자응집제를 주입하면 미세플록이 무겁고 견고한 거대 플록으로 성장시켜, 침전지에서는 중력에 의해 고·액분리함으로써 탁도유발물질, 유기물 등 수중의 불순물을 제거하는 공정이다.

콜로이드의 크기는 1㎛~1㎚범위이며, 주로 탁도유발물질(1㎛ 전후), 천연 착색성분(1㎚), 바이러스(수십㎚), 세균류(1㎛~10㎛), 조류(1~수십㎛) 등이다.

수중의 콜로이드는 표면에 약한 (-)전하를 띠고 있다. 콜로이드 입자들은 입자상호간의 반발력 및 인력, 전기력, 중력 등의 작용으로 안정된 분산상태를 형성한다. 특히 단백질, 전분 등과 같은 친수성콜로이드는 동종 분자간의 결합력보다 물분자와의 친화성이 매우 강하여 안정된 분산상태를 유지한다.

응집은 콜로이드의 안정상태를 와해시켜 상호 접촉하고 결집되도록 불안정화하는 조작이다. 응집제는 콜로이드입자와 반대 전하를 갖는 이온 등의 미립자를 주입하여 그 전하에 의해서 응집대상 입자표면의 전하를 중화시킨다. 가장 많이 사용되

는 응집제는 Al염과 Fe염이다. 이러한 금속염들은 수중에서 가수분해되어 (+)전하를 가진 미립자가 된다.

(-)전하를 띤 콜로이드 표면은 응집제 주입에 의해 생성된 (+)전하로 중화되어 전기적 반발력이 상실된다. 이러한 입자들은 브라운 운동이나 주류에 의한 유동으로 상호의 근접접촉이 가능해진다. 즉 입자상호간에 van der Waals 힘이라고 하는 인력이 작용하고 있으므로, 전기적 반발력을 상실한 입자가 상호 접촉하면 이 인력에 의해 결합된다. 콜로이드 표면의 전기적 성질을 표시하는데 제타(zeta)전위라고 하는 지표가 이용된다. 응집을 촉진시키기 위해서는 제타전위를 0부근(등전점 즉, 0 제타전위)으로 하면 좋다. 이 값이 (+) 또는 (-)로서 크면 입자상호간의 전기적 반발력이 크게 된다. 수중에 존재하는 점토의 제타전위를 측정하면 -2~25mV 정도이다. 실제로 ±10mV 정도의 범위가 되도록 전하를 중화하면 van der Waals 힘에 의한 결합이 가능하게 된다. 그러나 실제 침전지에서 제거 가능한 크기(예, 500~1,000㎛)까지 콜로이드 입자를 결집 시키고자 한다면 적당한 강도의 교반에 의해 응집입자 상호간의 반복적인 충돌을 유도하고 큰 결집체로 만들 필요가 있다. 이것을 플록형성(flocculation)이라고 한다. 이와 같은 플록 형성과정에서 교반을 계속 견디며 플록이 성장하기 위해서는 van der Waals 힘에 의한 결합력만으로는 불충분하다. 따라서 입자상호의 결합을 보강하기 위한 물질이 필요하게 된다. 이 보강은 고분자의 성분이 콜로이드입자 쌍방에 흡착되어 상호간 다리를 놓는 것과 같은 효과에 의해 달성된다. 응집제가 갖추어야 할 제2의 역할이 이러한 가교작용이다. 따라서 응집제는 필요 충분한 크기를 가진 폴리머(고분자)일 때 효과가 크다. 알루미늄, 철 등의 응집제는 하전중화 기능과 함께 가교작용의 기능을 지니고 있다. 또 이러한 기능이 약할 때는 플록형성 보조제를 사용해서 보강한다. 하전중화를 위한 (+)하전량과 가교를 위한 불용성 알루미늄량이 균형을 이루는 곳에서 응집점이 결정된다. 다시 말해서 점토계 성분은 중성부근, 색도계 성분은 pH 5 부근이 일반적으로 최적응집 pH 조건으로 결정된다.

응집제를 과량으로 투여하면 (-)하전 표면이 외관상 (+)하전 입자와 같이 연화한다. 이와 같은 현상을 하전의 역전이라 한다. 하전이 역전하여 (+)의 콜로이드 입자

로 변하면 콜로이드 입자는 다시 상호간에 반발하고, 재차 수중에 분산한다. 일반적으로 이러한 상태가 되면 침전지에 하얀 탁도물질의 부유현상이 관찰된다. 이것을 재분산(재안정화) 현상이라 한다. 투여한 보조제가 활성규산과 같은 (-)콜로이드(음이온)의 경우에는 (+)하전의 응집제 폴리머가 규산에 부착하고, 접합용 실과 같은 작용을 하여 결합력을 강화시킨다고 사료된다(이성우, 2003).

2. 공정별 분류

가. 혼화지

응집제가 수중에서 가수분해하여 중합반응을 일으키는 속도가 대단히 빠르므로 최대한 급속교반으로 작은 수산화물 콜로이드를 많이 발생시켜서 수중에 분산된 탁질 콜로이드와 반응시키기 위하여 생성된 수산화물 콜로이드를 될수록 균일하게 확산시켜야 한다. 혼화방식에는 수류 자체의 에너지에 의한 방법과 기계적 에너지를 사용하는 방법이 있다. 수류자체 에너지를 사용하는 방법에는 수평이나 상하 우류식의 저류판을 설치하여 수류방향을 급변시켜 난류를 일으키는 방식과 관로 중에서 난류를 일으키는 방식이 있다. 어느 경우에나 유속이나 주변속도가 1.5m/sec 이상이고 체류시간은 1~5분이 표준인데 입경이 작은 유기질 콜로이드는 충분한 혼화시간이 필요하고 점토질 콜로이드와 같은 경우는 단시간 혼화하면 된다. 또한 혼화지의 유입수와 유출수는 단락류가 발생하지 않는 구조로 하고 효과적으로 혼화되도록 해야 한다.

나. 플록형성지

응집의 물리화학적 반응은 응집제를 원수에 주입하여 2~3분 정도 급속교반을 하고, 전체가 균일하게 될 때 생성된 입자는 응집제에 의해 하전이 중화된 점토 등의 콜로이드가 가교물질에 의해 약간 응집되어 있는 10㎛정도의 미립자이다. 이것을 미세플록 또는 마이크로플록이라 하고 이러한 플록은 여과지에서는 제거되나, 침전지에서는 전혀 제거되지 않는다. 이에 일반적으로 20~30분간의 느린 교반으로

이 플록들을 상호 충돌시켜 수백 ㎛ 크기의 침전 가능한 플록을 만든다. 플록이 이러한 크기에 도달하면 내부에 함유하는 공간이 증가하여 밀도가 낮아진다.

응집한 미세 플록은 충돌하면서 응집하고 성장하는데, 플록형성의 정도는

① 플록입자의 농도의 자승에 비례한다.

② 플록의 크기 즉 입자경의 삼승에 비례한다.

③ 속도경사 G값에 비례하나 너무 크면 전단력 증가로 플록이 파괴된다.

따라서 입경이 작은 초기에는 교반강도를 강하게 하고 플록이 점차 성장하면 3~4단으로 교반강도를 줄여간다. 체류시간은 통상 20~40분간이 적당하며 너무 짧으면 교반에너지를 충분히 가하더라도 플록형성 효과가 크게 저하한다. 플록형성지의 교반방법은 플로큐레이터를 설치하는 기계적인 방법이 있고 상하 또는 수평저류판을 설치한 우류식이 있다. 플로큐레이터의 주변속도는 15~80 cm/sec로 하고 유수관형에서는 평균유속을 15~30 cm/sec를 표준으로 한다. 플록형성시는 단락류나 정체부분이 생기지 않도록 하고 충분한 교반이 가능한 구조로 하여야 한다. 또한 플록형성지에서 발생한 슬러지나 스컴은 제거가 가능하도록 함이 바람직하다.

플록형성을 위해 어느 정도의 완속교반이 좋은가를 표시하는 지표로서 G*C*T라는 값을 이용한다. G라는 것은 교반강도로서 교반날개의 에너지 소비율과 물의 점성계수로서 표시하며, 일반적으로는 20~70 정도의 값을 취한다. C는 원수중의 현탁물 농도이다. T는 플록형성에 필요한 시간이다. 여기에서 농도를 물 1㎖중의 플록의 체적으로 표시하면 G*C*T는 무차원 수치가 되어, 어떤 상태의 플록을 형성하기 위해 필요한 교반조건을 나타내는 정량적인 지표가 된다. 즉, 어느 크기의 GCT치를 취하면 플록군은 어느 크기까지 성장하게 된다는 것이다. 저탁도(5도 정도)의 경우에 GCT치는 약200,000, 보통 탁도(50도 탁도)이면 약 20,000정도가 좋다고 되어 있다. 그러므로 저탁도 원수의 경우에는 G 값이 20정도이면 교반시간이 약 2시간이나 필요하게 된다. 이와 같은 저탁도에서는 완속여과지를 사용하는 경우는 약품에 의한 플록형성을 하지 않고 여과지만으로도 제거가 가능하나 급속여과지를 사용하는 경우는 플록형성이 필요하고 고탁도시보다 플록형성 시간을 최대 1시간 정도까지도 실시하여야 한다. 플록이 잘 형성되지 않는 원수에 점토를 가하거

나 활성규산을 주입하는 이유는 C를 크게 함으로써 제한된 시간 T내에서 GCT를 만족시킨다고 생각해도 좋다. 양호한 플록이 생성되는 임의의 GCT치에 빨리 도달하기 위해서는 교반을 강하게 해서 G값을 크게 하면 좋을 것이다. 그러나 G값을 너무 크게 하면(교반을 강하게 하면), 플록이 깨어지고 크게 성장할 수 없다. 따라서 플록을 어느 크기 이상으로 하기 위해서 어떻게 해서든 G값을 20정도의 낮은 수준으로 유지해야 한다. 단 교반(완속교반)의 초기에는 플록의 크기가 작아 파괴의 걱정이 없음으로 초기 단계에서는 큰 G값(70정도) 을 주는 것이 가능하다. 따라서 초기에 강한 교반을 하고, 플록이 성장함에 따라 G값을 줄이는 방법을 취한다.

다. 침전지

생성된 플록은 3~8시간의 체류시간을 유지하는 침전지에서 60% 이상이 침전되어 제거된다. 특히 밀도류나 바람 등의 영향으로 처리효율을 저해하기도 하지만 조류 등에 의한 가벼운 플럭이 많지 않는 한 침전지의 물질 제거효율은 매우 높다. 침전 효율을 높이기 위해 경사판이나 저류벽과 같은 시설을 하는 경우는 관리하는데 다소 일손이 많이 가지만 침전지 면적을 줄이는 데는 매우 효과적이다.

3. 응집공정 특성

가. 유기물 제거특성

대부분 자연수의 유기물은 카르복실기 또는 페놀기와 같은 작용기를 가지고 있어서 음이온을 띠고 있으며, pH에 따라 작용기의 전하가 이동된다. 저분자 fulvic acid의 경우 비교적 분자량이 큰 humic acid보다 강한 음전하를 갖는다고 보고되고 잇다. 응집공정에서 유기물은 3가지 mechanism 즉, 하전중화, sweep 작용 및 흡착공정을 거쳐 제거된다. 하전중화는 금속염 수산화물의 침전물 형성이 최소가 되는 영역에서 유기물과의 침전물 형성으로 설명 될 수 있다. 또한 불용성의 알루미늄 수산화물이 형성되는 영역에서 유기물은 sweep 응집 또는 표면흡착으로 제거된다.

그러므로 $Al(OH)_3$의 빠른 침전을 일으키기 위해서는 하전중화를 일으킬 수 있는 만큼의 응집제가 필요하다. 이때 콜로이드성 유기물은 $Al(OH)_3$ 콜로이드가 생성될 때 하나의 핵으로서 작용하여 하전중화 후 물리적인 인력에 의한 floc의 성장을 돕는다. 유기물 제거에는 Al(Ⅲ)염과 Fe(Ⅲ)염 응집제가 사용된다. 가수분해 과정에서 생성되는 착화합물의 종에 따라 유기물 제거에 대한 응집효과가 서로 상이하다. 응집제의 따른 유기물의 제거 mechanism은 가수분해된 monomeric종과 polymeric aluminum complexes, HA-Aluminum 침전성 착화합물 형성 및 Aluminum hydroxide 침전물 사이에서의 흡착과 침전이다. 유기물의 응집에 영향을 미치는 영향인자는 유기물의 농도, 응집제주입량, 알칼리도와 pH 등이고, 유기물 제거의 적정 pH가 5~6.5라고 하였다(Edzwald et al., 1977).

또한 Mangravite 등 (1975)은 humic acid 5㎎/L를 사용하여 시험한 결과 응집 pH와 응집제 주입량에 따라 두 가지 응집영역 즉, 양의 전하를 가진 Al(Ⅲ)종들과 음전하를 가진 humic acid 분자와의 화학적인 결합에 의한 제거 영역과 알루미늄 수산화물 형성에 따른 흡착으로의 유기물 제거 영역으로 구성되어 진다고 추정하였다. 첫 번째 제거 영역에서의 주 mechanism은 알루미늄과의 하전 중화에 따른 침전물 형성에 의한 유기물 제거를 칭하는 것으로 유기물 제거에 따른 응집 pH 범위는 4~5.5라고 하였다. 이러한 mechanism의 특징은 pH 범위가 좁으며 수중의 유기물 농도와 적정 응집제 주입량 사이에 화학 양론적으로의 관계가 성립된다고 하였다. 그리고 두 번째 mechanism 영역은 sweep coagulation 영역으로서 비결정성의 $Al(OH)_3$가 발생하며, 유기물은 pH 6~8 범위에서 $Al(OH)_3$의 표면에 흡착됨으로써 제거되어진다고 하였다. 이와 같은 mechanism에 따른 유기물과 탁질의 차이점은 아래와 같이 제시할 수가 있다. 후자의 sweep coagulation에 의한 mechanism 영역에서의 탁질 제거는 일반적으로 $Al(OH)_3$에 의한 물리적인 체거름 현상에 의해 이루어지고, 전자의 경우인 하전중화와 침전에 있어서는 탁질 주위로 알루미늄에 의한 입자의 불안정화를 초래하여 반발력이 감소됨으로서 탁질 입자가 제거된다.

나. 하전중화반응

가수분해 반응을 거치는 금속염을 응집제로 이용하여 하전중화하여 콜로이드를 불안정화시키는 하전중화 메카니즘에 있어서는 금속의 가수분해 반응이 완료되어 금속수산화물로 응결되기 이전에 중간단계에서 생성된 가수분해 종과 콜로이드 입자간의 충돌을 유도하여야 한다(Letterman et al., 1973).

가수분해된 단량체(monomer)는 수백만분의 일초 이내에 형성되고, medium polymer 는 1초 이내에 형성된다(O'Melia, 1972). Aluminum hydroxide precipitate, $Al(OH)_3$의 형성은 더 느리고 1~7초 사이에 일어난다(Letterman et al., 1973). 그러므로 전하중화가 효과적으로 일어나기 위해서는 원수 내에 응집제를 0.1sec 이하 정도로 빠르게 분산시키는 것이 생성되는 가수분해종이 콜로이드를 불안정화 시키는데 필수적이다.

반면에 Ranntke(1988)는 pH가 5~6일 경우 혼화메카니즘이 흡착 하전중화가 된다고 보고한 바 있다. 또한 이 등(1988)의 연구에 의하면 수화과정에서 과량의 수소이온이 해리되면서 이들이 일시적으로 pH 4 이하까지 저하시키는 것으로 보고하였다. 이때 알칼리도나 pH가 높은 경우에는 pH 저하현상이 매우 짧게 나타나며 용존 유기물 제거율이 저하되는 것으로 나타났다. 또한 응집제 확산시간이 pH 6.5이상에서는 수처리 효율에 매우 큰 영향을 미쳤으나 그 이하에서는 응집제 확산시간에 따른 차이점이 거의 없는 것으로 보고하였다. 결국 하전중화 메카니즘은 응집제 확산시간과 가수분해 반응시간이 주 인자이며 응집제 확산시간은 반응조의 크기와 교반강도에 의해 조절이 가능할 것으로 판단된다. 가수분해 반응시간은 응집제 주입량, pH, 알칼리도 등이 복합적으로 작용하는 것으로 판단할 수 있다.

다. 응집방식

Sweep응집은 응집제 요구량 이상의 과량의 응집제를 주입하여 sweep 작용(평형상태로 안정되려는 성질)에 의해 콜로이드물질을 제거하는 방식으로서 정수처리에서 가장 많이 사용되고 있는 혼화방식이다. 이렇게 많이 사용되는 이유는 수처리 효율이 타 방식에 비해 상대적으로 낮은 편이지만 가장 안정적인 수처리 효율을 나타내기 때문이다. Sweep응집방식은 pH 및 최적 응집제 주입량 폭이 매우 넓다.

따라서 원수특성이 일부 변해도 응집특성이 크게 변하지 않으므로 정수의 수질을 어느 정도 안정적으로 보장받을 수 있다.

Sweep 응집이 안정적인 수처리 효율을 나타내는 또 다른 이유는 응집제가 주입되어 Sweep응집이 일어나는 동안 생성된 침전물과 원수중의 콜로이드 입자들 사이에는 물리적인 상호작용이 일어난다. Sweep응집조건에서는 물이 금속자체의 용해도보다 1,000~10,000배 정도 과포화 되어 있어서 1~7초 만에 빠르게 침전물이 형성된다(Letterman et al., 1973). 따라서 이러한 조건하에서는 콜로이드와 응집제 간의 물질이동작용은 후속되는 플럭 형성단계에 비해 덜 중요하다. 즉, Sweep응집 조건하에서는 짧은 분산시간과 높은 강도의 급속혼화 조건이 전하중화 메카니즘 만큼 중요하지 않고 불안정화 단계 동안 응집제 양상과 플럭형성 단계 동안의 이동 양상만이 중요하다.

미국 EPA는 1979년 음용수에서 THMs의 수질기준을 0.10㎎/L로 정하였으며, 이후 0.08㎎/L에서 2002년에는 0.040㎎/L로 낮추었다. 그러나 미국 EPA는 THMs 뿐만 아니라 HAAs(Haloacetic Acids)에 대해서도 0.06㎎/L에서 2002년 0.03㎎/L로 낮추었다. 미국 EPA는 THMs와 HAAs에 대한 기준치를 만들기 전에 재래식공정, Enhanced coagulation, 오존, GAC (granular activated carbon), 막 등을 대상으로 TOC, THMs, HAAs에 대한 연구를 수행하였으며, Enhanced coagulation(강화응집)은 이러한 DBP (disinfectant byproduct) 물질의 최대 수용치를 충족시킬 수 있는 가장 우수한 기술(BAT; Best Available Technology)로 선정하였다. 이에 따라 1998년 USEPA는 Stage 1, Disinfection By-Products Rule(DBPR)을 통하여 재래식 정수장에 대하여 DBPs을 생성 제어하기 위한 방법으로 Enhanced coagulation 사용을 통하여 NOM의 제거전략을 세우도록 요구하였다. 이 공정의 주요 특성은 금속염 응집제가 수처리에서 탁도 제거에 주로 사용되어 왔으나 일부 응집조건의 조정을 통하여 소독부산물의 전구물질인 NOM제거에 이용할 수 있도록 하였다(USEPA, 1994). Enhanced Coagulation의 목표는 DBP의 전구물질을 제거하는 것이고, TOC는 이것을 나타내는 지표로 사용되어진다. Enhanced coagulation은 NOM 제거를 하면서 효과적으로 탁도도 제거하기 위해 응집제의 형태, 주입량, pH

를 변화시켜 최적상태를 적용하는 방안이다. Enhanced coagulation은 2단계로 구성되어 있으며, 1단계는 현재의 공정에서 사용되는 원수의 알칼리도와 TOC값을 이용하여 제거하고자 하는 TOC 농도의 목표값을 결정하며, 2단계는 만일 1단계에서 목표치만큼의 TOC를 제거하기 어려운 경우에 Jar test를 통하여 응집제를 사용하여 원수의 알칼리도에 따른 목표값 만큼 pH를 낮추기 위하여 응집제를 첨가한다. 이때의 pH를 최대 pH라 하는데 이는 유입수의 알칼리도에 따라 다르다. 그리하여 TOC 제거효율에 대한 결과를 토대로 하여 10㎎/L 응집제 주입량당 TOC 0.3㎎/L 이상을 제거하지 못할 때까지 최대로 주입된 응집제량을 적정량으로 결정한다. 즉 잔류 TOC 대 Alum 주입량의 그래프를 그렸을 때 Curve slope ≤(TOC 0.3㎎/L)/(10㎎/L Alum)이 되는 점에서의 응집제의 주입량을 최적 응집제 주입량으로 결정한 것이다. 이점을 Point of diminishing returns(PDR)이라 하고 이때 제거된 TOC가 1단계에서 제시한 TOC 제거기준을 만족하여야 한다.

Table 1. Optimum pH for Enhanced coagulation according to alkalinity

Alkalinity(㎎/L as $CaCO_3$)	Optimum pH
0～60	5.5
〉60～120	6.3
〉120～240	7.0
〉240	7.5

Table 2. Point of diminishing returns for Coagulant

Coagulant	Molecular weight (g/mol)	Coagulant dose equivalents(㎎/L)	Point of diminishing returns(mg/mg)
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$	594.36	10	0.03
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	666.42	11.2	0.027
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	270.30	9.1	0.033
$FeCl_3$	162.21	5.5	0.055

Table 1과 2는 알칼리도에 따른 최적 pH와 응집제에 따른 주입량 대비 TOC 제거농도를 보여주고 있다.

제2절 흡착공정

1. 개요

흡착제로서 가장 일반적으로 사용되는 활성탄은 무정형의 탄소 구조체(amorphous carbon)를 가지고 있으며, 흑연과 유사한 구조를 가지고 있다. 세공구조는 제조하는 과정 중의 활성화 공정에 따라 달라진다. 탄화과정 중에 많은 세공이 발생하며, 보통 1g당 500～2,000㎡의 세공면적을 가지고 있다. 세공 크기에 따라 Macro-pore (반경이 1,000～100,000Å), Transitional-pore (20～1,000Å), Micro-pore (0～20Å) 등으로 나누고, Micro-pore의 세공용적은 0.1～1㎎/L, 비표면적은 2,000㎡/g 이상으로, 총 비표면적 중 95% 이상을 차지하고 있다. 따라서 흡착용량의 결정은 Micro-pore에서 대부분 이루어지고, 성상에 따라 분말활성탄은 Macro-pore가 잘 발달되어 있고, 입상활성탄은 Micro-pore가 잘 발달되어 있다.

활성탄의 원료로는 식물계, 광물계, 기타 등으로 분류하는데, 식물계로는 목재, 톱밥, 목탄, 과실종자 등이 있으며, 광물계로는 초탄, 역청탄, 무연탄, coke, coal tar 등이 있고, 기타 천연소재나 합성소재류 등이 있다. 비표면적(specific surface area)이 활성탄의 중요한 인자인 이유는 흡착질 및 용매와의 상호작용이 가능한 표면의 지표, 표면현상을 결정하는 지표로서 중요하기 때문이다. 비표면적 측정법으로는 BET(Brunauer-Emmett-Teller)법, Langmuir법, t 법 등이 있으며, 기체흡착에 의한 표면적 측정방법인 BET법은 다분자층 흡착을 고려하고 있는 반면, Langmuir법은 단분자층 흡착이론에 의해 설명되어 진다. 흡착제 중 합성제올라이트가 극성이고 불포화성이며 분자직경이 작은 반면, 활성탄은 비극성이고 포화성이며 분자직경이 큰편에 속한다. 활성탄에 의한 흡착은 주로 활성탄의 세공구조에 의해 발생되지만 활성탄의 표면에 발달한 관능기에 의한 영향도 매우 크다. 관능기는 유기물과 유기물/무기물 결합물의 두 가지가 존재하며, 유기물인 경우는 헤테로(이종) 원자단 관능기이며, 유기물/무기물인 경우는 약 4% 정도의 회분을 구성하는 칼륨, 알루미늄, 규소, 나트륨, 스트론튬, 납 등이 결합형태로 존재한다. 유기물 관능기는 주로 C-H, -CHO, -OH, -COOH, 페놀성수산기, 에스테르 등이다.

2. 흡착평형

흡착(adsorption)이란 일반적으로 물 내의 한 용존 화학종 (dissolved species) 또는 가스 성분이 흡착제의 표면에 고착되는 현상을 가리키는 것이며, 탈착(desorption)은 이와 반대로 흡착제의 표면에 있던 화학종이 용존 성분 또는 가스의 형태로 물로 방출되는 것이다. 보통 흡착 및 탈착은 교환할 상대 이온을 필요로 하지 않는다는 점에서 이온 교환과 구분된다. 흡착제를 미량의 흡착질이 함유된 수용액 중에 일정한 온도 하에서 장시간 접촉시키면 흡착질은 흡착제의 표면에 농축되기 시작하여 더 이상 흡착이나 탈착도 일어나지 않는 평형에 도달되게 된다. 이때 액상의 농도와 흡착제에 흡착된 흡착질의 농도 사이에는 일정한 관계가 성립되게 되는데 이것을 흡착평형(adsorption equilibrium)이라한다. 수용액의 흡착에 가장

많이 이용되는 관계식은 Freundlich와 Langmuir 흡착평형식이다. 온도가 일정한 상태에서 이루어지는 경우는 흡착등온식이라고 한다.

Freundlich 식 $q = kC^{1/n}$

Langmuir 식 $q = abC/(1+bC)$

k 와 n : Freundlich 상수, a와 b : Langmuir 상수

q : 흡착량(mg/g), C : 대상물질의 액상내의 농도(㎎/L)

1/n 값이 0.1~0.5의 경우는 흡착분리가 바람직한 평형관계를 나타내지만, 1/n>2의 경우는 비효과적이다(眞田雄三 외 2명, 2001).

3. 흡착속도

흡착평형은 시간에 관계없이 흡착제에 최종적으로 어느 정도의 흡착이 일어날 수 있는가를 나타내는 관계식이다. 흡착의 단계는 (1) 고-액 경막 내의 이동, (2) 흡착제의 입자 내에서 흡착점으로 확산이동, (3) 흡착점에서 흡착반응의 3단계로 나눌 수 있다. 따라서 경막물질이동계수, 입자내 확산속도, 흡착점에서 평형도달속도 등이 전체의 흡착속도에 관계하여 어느 한 부분이 전체의 속도를 지배하는 율속단계인가는 흡착제의 물성, 흡착계, 흡착조작조건에 의해 달아진다. 흡착공정은 흡착제입자를 충전한 고정층에서 유체를 흘러보내어 유체 중에 함유된 목적성분의 흡착분리를 하는 경우가 많다. 충전층 중의 흡착제의 경막에 있어서 물질이동속도를 고체표면의 단위면적당 속도 N으로 표시하면 다음과 같다.

$$N = k_F(C - C_s)$$

여기서, k_F : 물질이동계수

C : 유체농도

C_s : 입자의 표면농도

k_F는 유속에 따라 변하는데, 그 추산식은 Wilson식, Carberry식 등이 사용된다.

흡착제의 입자내 확산은 세공내 공간의 흡착질의 농도 차에 의해 이동하는 세공확산(pore diffusion)과 세공 내 표면에 흡착된 분자의 흡착상태로 이동하는 표면확

산(surface diffusion)으로 나누어진다. 수용액 중의 유기물의 흡착은 주로 표면확산이 지배적인 경우가 많으며, 경막의 물질이동속도와 입자내 확산속도에 의해 전체의 흡착속도가 결정된다.

분말활성탄에 의한 수처리시 접촉시간은 20분 이상되어야 하고, 주입량은 제거목적 물질에 따라 10~100㎎/L의 범위이다. 입상활성탄에 의한 이취미 제거시설을 운영할 경우 생물활성탄이 활성화되고 파과점 (breakthrough point)을 연장시킬 수 있는 장점이 있다. 이는 활성탄 표면에 서식하는 미생물로 인해 활성탄에 포화된 유기물이나 오염원들을 분해해서 활성탄의 기능을 회복시키기 때문이다. 상수에서는 많이 사용되는 처리공정으로서 암모니아성질소 등의 제거에도 효과가 있다(이성우 외 4명, 2003).

4. 표적화 방법

흡착에 관여하는 성분등의 수와 특성을 정확하게 파악하는 것은 매우 어려우며, 이를 이론적으로 모사하기 위해 유사성분끼리 분류하여 모사하는 방법을 사용한다. 이를 위해, 모든 유사성분들이 동일한 Freundlich exponent n 을 갖는다고 가정하면 흡착친화성을 나타내는 Freundlich 상수 k 에 의존하는 표적화 방법을 사용할 수 있다. 유사성분들의 조성을 Freundlich 상수 k 항과 관련된 불연속적인 이항분포를 이룬다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다(Yang, 1987).

$$x_j = \sum_{j=1}^{N} s^j (1-s)^{N-j} \qquad j = 0,\ 1,\ 2, \cdots,\ N$$

여기에서 s는 skewness, N은 유사성분의 수를 나타내며, j는 Freundlich 상수 k_j에 의해 지정되고, 다음식으로 표현된다

$$k_j = k_s j^2$$

여기에서 k_s는 scale factor 이며, 그 용액에서 흡착력이 가장 작은 k 값을 의미한다

이들 변수값들은 각각 다른 초기농도에서 얻어진 실험 Data 값과 표적화 결과 값과의 오차가 최소화 되도록 목적함수 F 값을 최소화함으로서 얻어진다.

$$F = \frac{100}{ND}\sum_{m=1}^{ND}\left[\left(c_{Texp} - c_{Tcal}\right)/c_{Texp}\right]_m$$

초기농도는 표적화 결과로부터 아래 식으로 주어진다.

$$c_{i0} = x_{i0}c_{T0} \qquad i = 0,\ 1,\ 2,\cdots,\ N$$

여기에서 C_{T0}는 total TOC 농도, X_{i0}는 i성분의 초기 TOC fraction 이다.

제3절 막분리 공정

1. 막분리 개요

막분리는 상변화를 수반하지 않고 단순히 압력차에 의하여 물리적으로 고체와 액체를 분리하는 기술로서 분리할 때 분리 특성을 높일 수 있는 효율적인 분리법이다. 막분리는 반투과성 막을 이용하여 어떤 물질을 성질이 다른 물질과 분리 혹은 전달하는 것이라고 정의할 수 있으며, 단순히 어떤 크기 이상을 분리 혹은 전달하는 것 이외에도 전하 반발력, 용해도, 확산률 등의 성질을 이용하여 분리 혹은 전달을 강화시키기도 한다. 이러한 분리에 이용되는 추진력(driving force)으로서는 압력, 농도차, 온도차, 전자기장 등이 있다. 막분리 기술은 1960년대 셀룰로오스막에 의한 역삼투법을 이용한 해수의 담수화 기술로 시작해서 현재는 저분자량까지 제거할 수 있고 슬러지 발생이나 소독제 등의 약품 소모가 적으며, 사용하는 막의 종류에 따라 제거할 수 있는 오염물질의 크기나 성상의 한계가 명확하여 처리수의

목표수질에 만족할 수 있는 적합한 수준의 막분리 기술까지 개발되었다.

막의 투과 메카니즘은 막 재료의 분자구조, 제막조건, 미세공의 크기, 다공성 및 분리 유체의 화학적 성질 등에 의해 결정된다. 막의 분류는 성질에 따른 분류, 형질에 따른 분류, 구조에 따른 분류, 적용에 따른 분류, 구성 재료에 따른 분류 등으로 나누며, 막의 재료에 따라서 셀룰로오스계, 합성수지계, 세라믹계 등으로 구분되는데, 최근에는 폴리아마이드계가 주로 사용되고 있으며, 오존 등의 산화제 영향을 최소화하기 위해 PVDF, PAN 등의 재료도 사용되고 있으나 가격이 비싼 편이다 (조봉연 편, 1999).

멤브레인의 종류를 공극의 크기로 분류하면 microfiltration (MF), ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF), reverse osmosis (RO) 등으로 분류할 수 있으며, 제거 분자량 범위, 사용 압력, 입경의 크기 등을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Membrane properties for filtration processes

Filtration process	Pore size(μm)	Dalton ranges(Da)	Pressure(kPa/psi)
MF	0.01-10	100,000 이상	<200 (<30)
UF	0.001-0.02	1,000-100,000	100-1,000(15-150)
NF	0.0008-0.002	100-1,000	1,000-2,500(150-375)
RO	0.0001-0.001	100 이하	1,500-8,000(225-1,200)

2. 정밀여과막

막의 제거특성은 막의 공경(pore)의 크기 혹은 분획분자량(MWCO, Molecular Weight Cut-Off)의 기준에 따라 분류된다. 정밀여과(MF)막은 수중의 미세물질 (micronsized materials, 10^{-6}m)을 제거할 수 있고, 한외여과(UF)막은 더욱 작은 물질(Nanosized materials, 10^{-9}m)을 제거할 수 있다. MF막은 대체로 0.025~10㎛ 크

기의 공경을 갖고, 이보다 큰 범위의 콜로이드, 현탁입자, 세균 등의 분리가 가능하며, 여과는 체분리의 물리적인 방법에 의해 액체로부터 고형물을 분리하는 공정으로서 분리는 막 표면과 용액의 상호작용에 의해 영향을 받게 된다. 막의 높은 공경밀도는 유체역학적 저항이 비교적 낮아 높은 유속 혹은 플럭스를 의미한다.

MF막의 분리기구는 표면여과와 내부여과의 2종류로 구분한다. 완전폐쇄(complete blocking)는 공경구조의 원통상도 보이지 않고 공경보다 큰 입자가 공경입구에서 채워져 막힘이 급격히 진행되어 완전폐쇄를 일으키는 것이다. 중간폐쇄(intermediate blocking)는 공경보다 큰 모든 입자가 공경의 폐쇄에 관여하는 것이 아니고, 여액량이 증가함에 따라 확률적으로 공경이 폐쇄된다고 보는 모델이다. 표준폐쇄(standard blocking)는 공경구조의 원통상도 보이지 않고 입자가 공경 내부에 들어가 그 내벽에 채워져서 그 결과로 여과의 진행과 동시에 공경이 감소한다고 가정한 폐쇄 모델이다. 케이크 여과(cake filtration)는 막 표면이 현탁물질에 의해 케이크 층이 형성되어 여과에 영향을 준다고 생각하는 모델이다. 특히 현탁물질과 콜로이드 물질이 막힘에 영향을 주고, 많은 물리적, 화학적 변화가 일어나 제거메카니즘에 변화를 주게 되는데, 이런 경운 응집공정 등의 전처리 공정에 의해 막의 막힘에 대한 영향을 줄일 수 있다. 소수성 막은 특히 단백질에 의해 막 오염이 증가된다. 막오염을 세척시는 화학약품을 사용하게 되므로 화학적 저항성이 있는 재질을 선택해야 한다.

3. 한외여과막

한외여과(ultra filtration)막은 MF와 비슷하지만 미세한 입자들을 보다 효율적으로 여과하기 위하여 비대칭막으로 제작된다. 막의 상층부 공경은 0.05~1nm 범위이다. UF는 유체로부터 아주 작은 입자나 용존 분자를 분리하는 공정이다. 분리를 위한 1차적 기준은 분자의 크기이고, 2차적으로는 분자 형태나 전하가 중요한 역할을 한다. 분자량 1,000~1,000,000범위의 물질이 UF 막에 의해 분리될 수 있고, 물이나 염은 통과하지만 콜로이드나 입자물질은 제거될 수 있다. 운전 압력은 증가하

며 15~100psi 정도가 필요하다. MF의 용질분리 주 메카니즘이 체분리이지만, UF는 더 작은 용질에 대해서는 확산이 중요하게 될 수 있는 넓은 크기의 범위를 담당한다. 막 표면에 농도분극 현상이 발생하게 되어 막 표면의 용질 농도가 원액보다 특별히 높다. 따라서 경막 중에서 물질이동계수를 정확히 추정하는 것이 매우 중요하다.

4. 막오염

막오염은 전처리하지 않는 정밀여과막과 한외여과막의 여과에 있어서 플럭스 감소의 주요 원인이다. 막오염은 근본적으로 막 표면이나 공극에 저류된 입자(콜로이드, 염, 대형분자 등)의 축적이다. 이러한 퇴적물의 축적은 시간에 따른 플럭스의 연속적인 감소를 야기한다.

생물학적 막오염은 막 재질, 용존물질, 유체 흐름 파라미터, 미생물의 복잡한 상호작용의 결과로서 근본적으로는 생물막(biofilm) 성장의 문제이다. 미생물 오염의 주요 근원은 공급수로서 미생물의 함량이 높은 지표수는 생물학적 문제를 초래할 경향이 있다. 생물학적 막오염은 비교적 완속 공정으로서 그 영향은 플럭스의 속도에 따른 점진적으로 감소와 투과막과 압력차의 점진적인 증가 및 최소 저지율의 점진적인 감소로 나타나고, 결국 막 수명의 감소, 세정 및 유지비용의 증가, 생산수질의 저하를 일으킨다.

일반적으로 막의 저지율을 나타내는 분획분자량(molecular weight cut-off)은 90%의 저지율을 보일 때 그 막의 분획분자량이라 부른다. MF보다 UF의 경우 막의 분획분자량이 더욱 낮게 된다. 그러나 하수처리장 방류수를 화장실용수나 조경용수로 이용하기 위해서는 생산원가가 저렴한 MF를 이용하고 막 오염을 저감할 수 있는 방법을 동시에 적용하여 사용할 경우 매우 좋은 효과를 얻을 수 있을 것으로 본다(조재원, 2004).

가. 막오염 메카니즘

일반적으로 막오염을 유발하는 메카니즘을 분류하면 다음과 같다.

(1) 농도분극현상(concentration polarization)

멤브레인은 압력에 의하여 멤브레인의 구멍보다 큰 입자를 걸러내는 공정이므로, 멤브레인의 표면은 시간이 갈수록 멤브레인을 통과하지 못한 유기물, 입자로 인하여 그 농도가 높아지게 된다. 이 높아진 농도로 인해 멤브레인을 통과하는 물의 양이 줄어들게 된다.

(2) 젤 농축현상(gel layer)

농도가 증가하면 할수록 계속 입자 및 고분자들이 모이게 되어, 어느 수준이 넘어지면 젤화되는 시점에 이르게 된다. 이 젤은 멤브레인의 표면에 얇은 막을 형성하며 붙어있게 되는데, 이것들이 멤브레인을 통과하려고 하는 물의 양을 감소시킨다.

(3) 흡착현상(adsorption)

멤브레인의 표면에는 입자 및 고분자가 흡착되는데, 편평한 표면 혹은 멤브레인의 pore속으로 들어가 흡착되는 경우도 있다. 이러한 흡착은 멤브레인 구멍의 지름을 줄이고 혹은 완전히 막아버리게 된다. 이러한 현상을 흡착이라고 한다. 흡착이 심하게 일어나 멤브레인을 더 이상 사용하기 힘들게 되므로, 깨끗한 물을 이용한 역세척 혹은 화학물질(염기산 혹은 surfactant)을 이용한 세척이 필요하다.

나. 막 오염 형태

(1) *NOM*에 의한 막오염

NOM은 막의 표면에 겔층을 형성하거나 막의 내부로 흡수될 수 있으며, 보다 큰 콜로이드의 경우처럼 유기분자의 크기와 형태는 막의 공경으로 침착할 수 있는 가

능성을 물로, 막에서 떨어지거나 붙는 분자의 이송을 결정하는데 주요한 역할을 할 것이다. 따라서 원수의 NOM은 막오염을 일으키는 유기물 농도의 중요한 척도이다. 많은 연구자들은 무기 콜로이드에 대해 유기물이 자연적으로 일어나는 흡착과 그 결과로서 콜로이드의 안정성이 증가하게 된다고 설명한다(Davis, 1982, Ali, 1985, Tipping, 1982). 흡수된 유기물의 층에 의해 영향을 받는 콜로이드의 안정성은 pH, 이온강도, 용액내의 금속농도 및 흡수되는 유기분자의 크기, 기능성 및 소수성에 의해 영향을 줄 것이다. 또한 음전하 카르복실기와 양전하 칼슘이온과의 상호결합은 흡수된 humic 물질에 의해 콜로이드의 표면에 영향을 주는 전하를 감소시킨다. 칼슘농도가 높은 강물의 입자 칼슘농도가 낮은 물에서 입자보다도 작은 부(-) 전기영동적 운동성을 갖는다는 것을 발견하였다.

(2) 유기물 흡착에 의한 막오염

막오염의 대부분은 막의 공경 메트릭스에 유기물의 흡착의 결과로 보이며, 흡착이 잘 되지 않을 때에도 용존 유기물은 새로운 막의 교체 후 12시간 이내에 비가역적인 흡착이 일어나 플럭스를 상당히 감소시킬 수 있다. 원수에서 NOM의 특성과 막사이에서 상호반응은 막 공정의 효율을 결정하는 중요한 열쇠가 된다.

(3) 생물학적 오염(biological fouling)

막에 미생물의 성장과 축적은 투과 플럭스에 저항을 증가시키는 물질의 층이 생긴다. 박테리아 단독으로 야기되는 저항 이외에 미생물 케이크는 막 표면에 더 작은 물질을 보유시키고 투과 유속을 더 감소시킬 수 있다. 또한 미생물은 유기 용질을 방출하여 막에 의해 보유될 만큼 충분히 크며 겔층을 형성한다.

(4) 미생물에 의한 오염(microbial fouling)

미생물로 인한 막오염은 주로 배수처리를 위해 막을 이용하는 경우에 생기는 문

제로서 미생물의 대사산물에 의한 것으로 생각된다. 특히 미생물의 대사산물은 막에 부착한 미생물에 의한 것과 생물 반응조 중의 미생물의 증식에 의한 것 등으로 보인다. 생물처리에 있어서 미생물 현탁액의 농도가 막투과 플럭스에 미치는 영향에 대하여 호기성 활성탄이 현탁액을 막분리하는 경우 미생물의 농도가 4,000~24,000㎎/L의 범위 내에서는 막투과 플럭스에 영향이 없었다.

다. 막오염을 줄이는 방법

막 여과공정에서 막 오염을 줄이는 방법은 유입수와 막 표면에서 형성되는 여러 현상들을 제어하여 플럭스의 감소를 방지하는 것이다. 일반적으로 유입수의 전처리, 막의 세척, 막 표면의 특성개선, 물질전달 향상에 의한 방식 등으로 크게 분류된다. 막 표면의 개질과 물질전달 향상 방식은 최근에 실제 적용을 위해 연구되고 있는 분야이다.

(1) 전처리

유입원수의 전처리 방법은 최종 공정이 역삼투 방식인 경우에 전염소, 응집제 투여, 활성탄 처리 등의 다양한 방법이 사용되고 있다. 유기물에 의한 오염 중 비가역적인 오염(irreversible fouling)이 실질적인 문제이고 전처리의 목적이 이것을 해소하여 투과유량을 증가시키는 것이다.

응집제를 사용하는 경우, 입자의 제거 및 입자크기의 제어 등에 의한 오염원 저감 방안을 연구하였고, 용존 유기물에 의한 비가역적인 오염의 저감을 위하여 활성탄 흡착도 고찰 하였다. Laine(1989)은 하천수를 한외여과하는 경우 응집, 활성탄 흡착이 용존유기탄소(DOC)와 탁도 제거에 미치는 영향을 조사하였고, 응집처리는 막 케이크의 저감에는 효과가 있었으나, 처리수의 수질 향상에는 영향이 적었다고 보고 하였다.

(2) 막의 특성 개선

막의 특성이 오염에 미치는 영향에 대해서는 丹保 등(1994)이 하천수의 처리를 위해 한외여과(UF)와 정밀여과(MF)를 이용하여 처리하였고, 막투과 플럭스에 미치는 영향을 고찰하였다. 그 결과 막투과 플럭스에 미치는 막공경이 존재하였고, 막투과 플럭스의 저하에 주로 영향을 미치는 입장의 크기는 막공경보다 약간 작은 물질이라고 하였다. 이러한 성분으로는 콜로이드성 고분자 휴믹질(Humic substances)로 판단되고, 막 공경의 선정은 막힘에 영향을 주는 원인 물질보다 약간 작은 것이 필요하다고 하였다. 일반적으로 친수성 막이 소수성 막보다도 상대적으로 막오염이 낮은 거동을 보이므로 막표면의 친수화 시도가 많이 행해지고 있다. 소수성과 친수성 고분자를 상호 혼합하는 것이나, 플라스마 및 이온처리, 자외선이나 열에 의한 계면중합, 특정 이온기의 부여 등에 의한 소수성 막의 표면을 친수화하는 것 등인데, 이렇게 하여 막투과 플럭스의 감소를 저감할 수 있다고 보고 하였다(Laine, 1989).

(3) 막의 세척

막 오염을 최소화하기 위한 가장 직접적인 방법은 막을 세척하는 것인데, 물리적인 방법과 화학적인 방법으로 대별할 수 있다. 물리적인 방법으로는 수력적 효과를 이용한 back-flushing으로 막표면에 형성된 케이크를 흐름과 반대방향으로 물을 역류시켜 케이크를 파괴하는 방식이며 압력에 따라 막오염 제거 정도가 달라진다. 화학적인 방법으로 가장 많이 사용되고 있는 화학약품은 산(H_3PO_4), 알카리(NaOH), 계면활성제(음이온, 비이온), 효소류, EDTA, H_2O_2 등이며, 오염물질을 분해하거나 저분자화 또는 가용화시켜 오염물질이 막의 표면에서 쉽게 분리될 수 있도록 하는 방법이다.

(4) 물질전달 향상

막모듈의 기하학적 구조나 유체의 불안정성에 따라 농도 경계층에서의 물질전달 계수가 향상되는 원리를 기본으로 한 것이다. 예를 들면, 평판형 모듈에서는 난류 촉진물을 설치하고, 관형 모듈일 경우는 삽입물이나 static mixer를 배열한다. 막표면을 주름지게 하여 flow reversal을 일으키는 주름잡기(corrugations)방식과 맥동(pulsation, oscillation) 흐름을 일으켜 불안정한 유동을 발생시키는 방식도 제시되었다(Thomas, 1972, Rogers, 1992).

하수처리장 방류수의 이용을 위해 정밀여과를 사용하는 경우 전처리를 가장 저렴하고 효율적으로 하기 위해서는 응집공정을 도입하여 정밀여과 막오염의 주 요인인 콜로이드 물질을 제거하고, 자연유기물의 제거를 위해 활성탄 흡착을 막여과와 혼합공정으로 사용하여 막의 오염을 저감하고 막의 수명을 증가시키는 방안이 현실적으로 매우 실효성이 있을 것으로 판단되며, 본 연구에서는 응집, 흡착, 막여과의 조합된 공정 연구를 통해 하수처리수의 중수 공정을 확보하고자 하였다.

제4절 분자량분포(Molecular weight distribution)

방류수 중의 입자성 물질은 대부분 응집이나 멤브레인에 의해 제거되지만 일부 제거되지 않는 물질들은 분자크기의 물질들이 대부분이다. 따라서 응집, 흡착, 막분리 공정 각각에 대한 분자 크기 물질의 제거 특성을 파악하는 것은 막의 오염을 제어하는데 있어서 매우 중요한 인자라 할 수 있다. 특히 멤브레인 공정에서의 크기배제(size exclusion)에 의한 자연유기물의 제거를 고려한다면 자연유기물의 분자량 분포는 매우 중요한 역할을 하게 된다. 지금까지 자연유기물의 분자량은 UF막을 이용하여 크기별로 분류하거나 HPSEC(high performance size exclusion chromatography)방법을 이용하여 분석하고 있으나, UF막을 이용할 경우 멤브레인 표면에서의 농도분극 현상 때문에 실제보다 크게 측정되는 단점이 있어서 HPSEC를 이용한 방법이 보다 효과적으로 이용되고 있다. Chin et al.(1994)에 의하면 HPSEC 방법은 자연유기물의 상대적 분자량 분포 (RMM, relative molecular mass)의 측정 및 가중평균분자량(weight average molecular weight, M_w), 수평균분자량(number average molecular weight, M_n)과 polydispersivity(M_w/M_n)을 계산할 수 있다. 분산도가 1에 가까울수록 monodispersivity하고, 대상 시료의 분자량분포는 일직선에 가깝다고 볼 수 있다. M_w와 M_n은 다음식과 같이 구할 수 있다.

$$M_w = \frac{\sum_i n_i M_i^2}{\sum_i n_i M_i} \qquad (1)$$

$$M_n = \frac{\sum_i n_i M_i}{\sum_i n_i} \qquad (2)$$

여기서 n_i는 각각의 분자수이고, M_i는 해당 분자량이다.

분자량 분포 곡선은 HPLC 분석을 통해 나타난 RT (retention time)를 standard 식을 이용해 상대분자량 (Relative molecular weight, RMW)으로 전환한 후, 각 분자량의 UVA254 값으로 그려진 곡선을 적분한 전체면적에 대하여 각 분자량의 상

대적 비율을 이용하여 나타낼 수 있다. 여기서, '상대분자량'이라고 명명하는 이유는 SEC-HPLC 방법이 특정분자량을 지닌 표준측정물질들의 표준분자량식을 이용한 간접적 측정이기 때문이다. UV detector를 사용하는 SEC-HPLC 방법은 친수성 혹은 지방족(aliphatic)의 자연유기물에 대한 검출이 어렵다는 한계점을 가지고 있다. 따라서 이러한 한계점에 대한 대안으로 휴믹산이나 퓨빅산과 같은 방향족(aromatic) 물질뿐만 아니라 albumin, sucrose와 같은 지방족(aliphatic) 물질도 쉽게 검출할 수 있는 SEC-DOC 방법을 제시하였다(Her et al., 2002).

제5절 하수처리수의 이용

1. 광주광역시 하수처리장 시설현황

광주광역시 하수처리 시설은 2곳이고, 시설용량은 광주하수처리장 1, 2단계 600천ton/day과 송대하수처리장 120천ton/day 등 총 720천ton/day이다.

처리공법은 광주하수처리장은 표준활성슬러지법이고, 송대하수처리장은 1단계는 표준활성슬러지법, 2단계는 활성슬러지순환변법(MLE공정) + 화학처리 공법이다. 두 처리장의 방류수는 영산강 수계로 전량 방류되고 있다.

하수처리시설은 침사지, 유입펌프장, 최초침전지, 포기조, 최종침전지, 염소혼화지 등으로 구성되고, 슬러지 처리시설은 농축조와 소화조로 구성되어 있다. 시설별 용량은 Table 4와 같으며, 전체 공정도는 Fig. 1와 같다.

Table 4. Wastewater Treatment facilities in Gwangju sewage plants

구 분 \ 하수처리장		광주 1단계	광주 2단계	송대 1, 2단계
설치일자		1991.6.7	1997.5.15	2002. 1. 1
시설용량(천ton/day)		300	300	120
수처리 공 정	침 사 지	B4.2×L22×H4×4지	B3.4×L18×H4×4지	B2.2×L15×H1.1×4지
	유입펌프장	B24×L27×1지	B9.5×L29.2×1지	-
	최초침전지	D37×H3×8지	B7×L39×H3×32지	D24.5×H3×8지
	포 기 조	B8×L80.5×H5×24지	B7×L81×H5×32지	B7.5×L55×H5×16지
	최종침전지	D44×H3.2×8지	B7×L60×H3×32지	D29×H3×8지
	염소혼화지	B3×L348×H3×1지	-	-
슬러지 처 리 공 정	농 축 조	D16.5×H3×4조	D17.5×H3×4조	D11.0×H3×4조
	소 화 조	D20×H12×8조	D20×H11.5×8조	D19×H9.5×4조
처리방법		표준활성슬러지법	표준활성슬러지법	표준활성슬러지법 MLE공정+화학처리
탈취설비		활성탄흡착법	바이오필터법	토양탈취,바이오필터

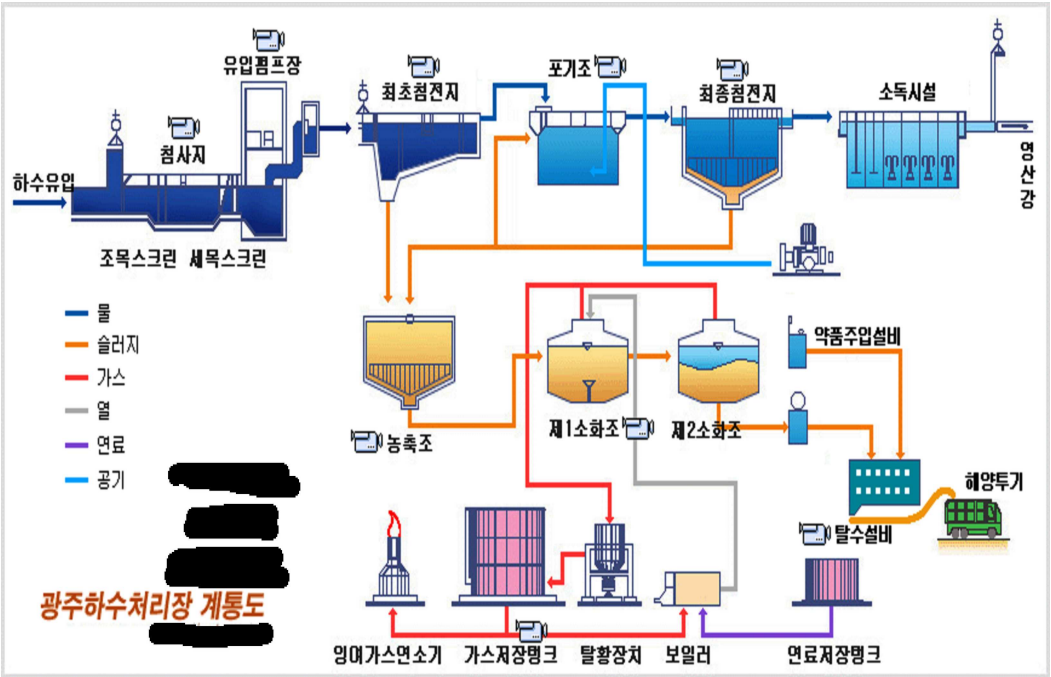


Fig. 1. Systematic diagram of sewage water treatment in Gwangju

2. 중수 수질기준

가. 우리나라의 중수 수질기준

Table 5에 중수 사용목적별 수질기준을 나타내었다.

우리나라 중수 수질기준은 수도법에 규정되어 있으며 용도는 수세식 화장실용수, 살수용수 및 조경용수, 세차・청소용수로 제한하고 있다. 공업용수로 이용하기 위해서는 용도에 부합되는 목표수질을 충족시켜야 한다.

현재 우리나라의 중수개념 및 기준은 개별건물에서의 폐쇄순환방식에 대해서만 정의하고 있는데 미국이나 일본의 경우처럼 하수처리수를 아파트단지의 생활용수나 지하수 함양용으로 재사용하는 광역중수에 대해서는 아직 법적 조치나 지침이 없는 상태이다. 우리나라와 중수 이용방식이 비슷한 일본의 경우 이용수의 용도가

다양하고 용도에 따른 수질기준이 정해져 있으며, 농업관개용수로 많이 이용하는 미국과는 달리 도시에서 이용하는 경우가 많고 수질기준 역시 미국과 상당히 다른 형태를 취하고 있다. 우리나라도 외국의 여러 사례들을 바탕으로 중수 수질기준을 개선하여 목욕용수와 같은 목적별 세부 수질기준을 강화하고 사용분야를 증대시킬 필요가 있다(환경부, 2003, 박석기 외 2명, 1996, 환경부, 1999. 6).

Table 5. The Criteria of reuse water according to drinking water's law

구 분	수세식 변소용수	살수용수	조경용수	세차・청소용수
대장균군수	검출되지 아니할 것	검출되지 아니할 것	검출되지 아니할 것	검출되지 아니할 것
잔류염소 (결합)	0.2㎎/L이상일 것	0.2㎎/L이상일 것	–	0.2㎎/L이상일 것
외관	이용자가 불쾌감을 느끼지 아니할 것	이용자가 불쾌감을 느끼지 아니할 것	이용자가 불쾌감을 느끼지 아니할 것	이용자가 불쾌감을 느끼지 아니할 것
탁도	2NTU를 넘지 아니할 것	2NTU를 넘지 아니할 것	2NTU를 넘지 아니할 것	2NTU를 넘지 아니할 것
생물학적 산소요구량 (BOD_5)	10㎎/L를 넘지 아니할 것	10㎎/L를 넘지 아니할 것	10㎎/L를 넘지 아니할 것	10㎎/L를 넘지 아니할 것
냄새	불쾌한 냄새가 나지 아니할 것	불쾌한 냄새가 나지 아니할 것	불쾌한 냄새가 나지 아니할 것	불쾌한 냄새가 나지 아니할 것
pH	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5	5.8~8.5
색도	20도를 넘지 아니할 것	–	–	20도를 넘지 아니할 것
화학적 산소요구량 (COD_{Mn}기준)	20㎎/L를 넘지 아니할 것	20㎎/L를 넘지 아니할 것	20㎎/L를 넘지 아니할 것	20㎎/L를 넘지 아니할 것

나. 일본의 중수 수질기준

일본의 일반적인 중수 수질기준을 Table 6에 나타내었다. 우리나라에서 정하지 않은 ABS(음이온계면활성제)와 증발잔류물이 포함되어 있는 것이 특징이다.

Table 6. The Criteria of reuse water in Japan

항 목	단 위	기 준 치
대장균군수	(개/ml)	10 이하
외관	-	불쾌하지 않을것
냄새	-	불쾌하지 않을것
음이온계면활성제	(mg/L)	1.0 이하
수소이온농도	-	6.5~8.6
COD	(mg/L)	20 이하
증발잔류물	(mg/L)	800 이하

(자료 : 중수 이용확대를 위한 정책방안 연구, 1999, 환경부)

Table 7. The Criteria of reuse water according to departments in Japan

구 분	건 설 성			후생성	동경도 도시계획국
	수세식 화장실용수	살수용수	조경용수	수세식 화장실용수	수세식 화장실 세정용수
pH	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6
BOD(mg/L)	20이하	-	10이하	-	-
COD(mg/L)	30이하	-	-	-	-
잔류염소 (mg/L)	유지	0.4이상	-	유지	유지
외관	불쾌하지 않을것	불쾌하지 않을것	불쾌하지 않을것	불쾌하지 않을것	불쾌하지 않을것
탁도(도)	-	-	10이하	-	-
냄새	불쾌하지 않을것	불쾌하지 않을것	불쾌하지 않을것	불쾌하지 않을것	불쾌하지 않을것
대장균수 (개/ml)	10이하	검출되지 않을것	검출되지 않을것	10이하	10이하

(자료 : 중수 기술개발 방안연구, 1994, 건설부)

Table 7은 일본의 중수 용도별 수질기준을 나타낸 것이다. 항목은 우리나라와 거의 유사한 데, 특이사항은 용도별로 기준이 세분화되어 있다는 점이다(제주도광역상수원관리본부, 2003).

Table 8에 일본의 중수 용도별 수질기준을 나타내었다. 목욕용수의 수질기준은 먹는물 수질기준과 거의 유사함을 알 수 있다. 목욕용수의 경우 색도가 5도 이하이고, 세탁용수의 경우 색도 10도 이하, 잔류염소 0.2㎎/L 이상으로 규정하고 있어 최종공정에서는 염소소독이 꼭 필요함을 강조하고 있다.

Table 8. The Criteria of reuse water according to the usage in Japan

구 분		목욕용수	세탁용수	청소・세차	살수용수	화장실용수
감각적	색도(도)	5이하	10이하	20이하	30이하	30이하
	탁도(도)	5이하	15이하	15이하	15이하	15이하
	냄새	가온해서 냄새없을것	불쾌한 냄새 없을것	불쾌한 냄새 없을것	불쾌한 냄새 없을것	불쾌한 냄새 없을것
시설기능적	pH	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6
	경도(㎎/L)	300이하	300이하	300이하	300이하	300이하
	잔류염소(㎎/L)	0.2이상	0.2이상	0.2이상	0.2이상	0.2이상
	염소이온(㎎/L)	200이하	200이하	400이하	400이하	400이하
	ABS(㎎/L)	0.5이하	0.5이하	1.0이하	1.0이하	1.0이하
	증발잔류물(㎎/L)	500이하	500이하	500이하	1,000이하	1,000이하
	철(㎎/L)	0.3이하	0.3이하	0.3이하	0.5이하	0.5이하
	망간(㎎/L)	0.3이하	0.3이하	0.3이하	0.5이하	0.5이하
위생적	$KMnO_4$소모량(㎎/L)	20이하	20이하	40이하	40이하	40이하
	일반세균(개/ml)	100이하	100이하	-	-	-
	대장균군(개/ml)	미검출	미검출	1이하	1이하	1이하

(자료: 중수 이용확대를 위한 정책방안 연구, 1999, 환경부)

다. 미국의 중수 수질기준

미국 환경보호청(EPA)과 국가개발청(USAID)은 수처리기술 향상과 관련제도의 발전에 부응하기 위해 1980년에 제정된 물 이용에 관한 기준을 1992년에 개정하였다. 물 이용 기준은 Table 9와 같고, 조경・세차・냉방 등 도시의 생활용수로 사용하기 위해서는 2차처리 + 여과 + 소독처리 등을 통하여 BOD 10㎎/L 이하, 탁도 2 NTU 이하, 잔류염소 1㎎/L 이상 등으로 정하여 원생동물이나 바이러스에 의한 위험을 최소화 하는데 주안점을 두고자 하였다.

Table 9. The Criteria of reuse water in USA EPA

이용 용도	처리수준	처리수의 수질	처리수 수질측정
도시용수 (조경・세차・화장실・소화・냉방용수 등)	- 2차 처리 -여과(모래 등) - 소독처리	- pH : 6~9 - BOD : 10㎎/L이하 - 탁도 : 2NTU이하 - 대장균군 : 불검출/100ml - 잔류염소 : 1㎎/L(최소)	- pH : 주 1회 - BOD : 주 1회 - 탁도 : 계속 - 대장균군 : 매일 - 잔류염소 : 계속
농업용수 (비식용작물・우유생산목장・꼴・섬유질사료・종자곡물재배용)	- 2차 처리 - 소독 처리	- pH : 6~9 - BOD : 30㎎/L이하 - TSS : 30㎎/L이하 -대장균군 : 200이하/100ml - 잔류염소 : 1㎎/L(최소)	- pH : 주 1회 - BOD : 주 1회 - TSS : 매일 - 대장균군 : 매일 - 잔류염소 : 계속
간접적 음용수 (음용수로이용하는 대수층으로의인공함양)	- 2차 처리 및 소독 (최소) - 여과 또는 고도처리	비포화대를 통해 침투한후에는 먹는물 수질기준에 적합해야 함	- pH : 주 1회 - 탁도 : 계속 - 대장균군 : 매일 - 잔류염소 : 계속 - 먹는물 수질기준항목은 분기별 1회 - 기타 항목은 필요시

(자료 : Guideline for Water Reuse, EPA/625/R-92/004, 1992)

3. 하수처리 방류수의 이용 사례

사람들은 하수를 더럽고 유해한 것으로만 인식하고 있으나 하수의 99%는 물이있기 때문에 이용할 수 있는 좋은 대체 수자원이다. 특히, 환경보전에 대한 주민의식 수준이 높아지면서 쾌적한 환경에 대한 욕구가 증가하고 있고, 예측할 수 없는 잦은 이상가뭄과 세계적인 물 부족위기에 대한 경고가 이어지면서 중수시설의 확대 필요성이 꾸준히 제기되고 있다.

이와 더불어 국내·외적으로 오·폐수처리기술이 급속히 발전되어 하수를 먹는 물로 이용하더라도 전혀 손색이 없을 정도로 깨끗하게 처리되고 있다. 여기서는 국내 중수 시설현황 및 외국의 하수처리장 방류수 이용 사례를 검토하여 광주광역시 하수처리장 방류수의 이용 방안을 모색하고자 한다.

가. 우리나라의 하수처리수 이용 사례(유태종, 2002)

(1) 우리나라의 하수처리량과 이용 현황

2002년 말 기준 전국에 가동 중인 하수종말처리장은 201개소이고, 시설용량은 총 19,976천m^3/일이며, 이 중 연간 6개월 이상 가동 된 190개소에서 처리된 하수의 양은 16,819천m^3/일이다.

Table 10. Present conditions for the reuse of sewage water in Korea

(unit : 1,000㎥/yr)

연도별	하수유입량	이용현황		이용 내역		
		이용량	이용율	계	처리장내	처리장외
2001	5,884,974	173,559	2.95%	173,559 (100%)	116,406 (67.1%)	57,153 (32.9%)
2002	6,128,780	261,926	4.27%	261,926 (100%)	193,067 (64.3%)	68,859 (35.7%)

2002년 기준 전국 하수처리장 방류수의 이용현황을 보면, 연간 총 하수유입량 61억m^3 중 4.2%인 2.62억m^3이다(Table 10).

Table 11. Present conditions for the reuse of sewage water according to the usage in Korea

연도	구 분	용 도 별										
		계	청소수	세척수	공업용수	냉각용수	희석용수	농업용수	하천유지	식수대살수	중수	기타용수
2001	이용수량 (천m^3/년)	173,559	7,491	62,729	492	19,268	6,982	19,934	35,523	1,204	500	19,436
	비 율(%)	100	0.03	34.30	5.89	15.72	2.72	3.93	22.55	0.76	-	14.10
2002	이용수량 (천m^3/년	261,926	13,004	101,086	-	21,302	8,582	10,206	58,653	1,170	800	15,159
	비 율(%)	100	5.0	38.6	-	8.1	3.3	3.9	22.4	0.4	0.3	5.8

<자료: 2002년 하수종말처리장 운영결과 분석결과, 2003, 환경부>

2002년도에 이용된 하수방류수 중 64.3%는 하수처리장내에서 화장실용수, 세정용수, 냉각용수, 희석용수, 기타용수(환경학습장, 소포용수 등)로 사용되었고, 나머지 35.7%는 하수처리장 외에서 공업용수, 농업용수, 환경용수(하천유지용수) 등으로 사용되었다(Table 11).

그러나 아직도 국내의 중수 보급이 저조한 이유는 수질을 비교해서 수도요금과의 가격 차이가 크지 않아 수돗물을 이용하는 것보다 경제적으로 부담이 크게 느껴지고, 하수를 재처리 했다는 인식 때문에 혐오감이 작용한다거나, 또한 중수를 이용하기 위해서는 별도의 처리시설과 배관망을 설치하고 유지관리를 꾸준히 해야 하기 때문이다. 게다가 중수 조례에서 정한 중수 설치비에 대한 세액공제의 범위는 5% 정도이고 상수도요금 감면혜택이 10~65% 수준에 불과하여, 중수 설치 및 운영비용과 비교할 때 자치단체의 지원 규모가 매우 미흡하여 중수 설치를 실질적으로 유인하지 못하고 있다. 그러나 장래 물부족 상황에 직면했을 때, 이를 해결하기

위한 직접적인 방법으로서 중수 사용을 권장해야 하고 이에 대한 제도적인, 경제적인 지원책을 제시해야 할 것으로 본다.

광주광역시 물 이용시설의 설치현황은 Table 12와 같고, 주로 청소용수, 조경용수, 화장실세정수 등으로 이용되고 있는 게 현 실정이다. 따라서 고급 수질의 중수를 확보하는 방안은 매우 필요하게 되었고, 세탁용수나 세면용수까지 이용 가능한 저렴한 중수 처리공정을 확보하면 매우 효용가치가 높으리라 본다.

Table 12. Present conditions of water usage facilities in Gwangju

건 물 명	중수원수	공급능력(ton/day)	용 도	설치년도
앰코테크놀러지 코리아(주)	공업용수	3,500	세척수, 청소용수	'96. 9
(주)OB맥주광주공장	공업용수	150	세척수, 청소용수	'96. 9
삼성광주전자환경센터	공업용수	3,000	화장실, 양어장, 조경수	'96. 9
세방전지	공업용수	540	공정청소, 세척수	'96. 9
대우전자	공업용수	700	세탁기생산, 공정시험수	'96. 9
K.T 빌딩	생활오・하수	20	화장실 세정수	2001
광주월드컵경기장	수영장 폐수	210	조경수, 화장실 세정수	2002

(2) 대구 신천하수처리장 방류수의 하천 유지용수 이용

대구광역시의 하수처리율은 1999년 현재 85.8%로서 높은 편이지만, 하수를 거의 차집하였기 때문에 도심을 흐르는 하천의 유지용수가 부족하게 되었다. 신천하수처리장은 중구, 동구, 남구, 북구 및 수성구 지역에서 유입되는 하수를 처리하여 금호강에 방류하는 가장 큰 규모의 하수처리장이며, 처리용량은 680,000m^3/일이다. 처리방식은 표준활성화법이고, 하수처리 인구는 1,081,850명이다.

신천하수처리장에서는 하천유지용수를 보충하기 위해 방류수 680,000m³/일 중 100,000m³/일을 신천 상동교까지 송수하여 유하시키고 있다.

(3) 광주천 건천화 방지사업

광주천 건천화 방지사업의 목적은 도시하수처리사업을 위한 차집관거 및 하수처리장의 건설로 인하여 하천 유지용수량이 감소되어 광주천의 적정유지용수를 확보하여 하천의 기능을 재생시키고 하천의 오염방지를 통하여 시민에게 쾌적하고 친밀감 있는 하천환경을 조성코자 시도하였다. 현재 광주천은 하수처리장 차집관거가 하천고수부지 양안으로 매설되어 있고 하천유입 하수관거가 대부분 차집관거에 연결되어 있기 때문에 갈수기에는 하천의 유하량 부족으로 인해 저질토의 퇴적 및 오염이 가속화되어 도심하천으로써의 기능을 상실하고 있는바 하천의 기능회복 및 친수형 수변공간으로의 전환이 요구되어 본 사업을 계획·시행하게 되었다.

광주천 건천화 방지사업의 주요시설은 영산강과 광주천의 합류점에서 영산강 상류 쪽 300m지점에 취수시설(집수매거)과 취수된 물을 광주천 상류부로 송수하기 위한 약 12km의 송수관로, 가압장 1개소로서 시설용량은 43,200m³/일 이다. 취수시설은 영산강 복류수를 주된 수원으로 하고 하수처리장 방류수까지 취수할 수 있도록 되어 있다. 총 사업비 6,671백만에 공사기간은 약 12개월이 소요 되었으며, 유지관리비는 전력비 117,439천원/년, 유지보수비 10,821.8천원/년으로 총 약 128,260.8천원이 매년 소요되고 있다. 계획 당시의 광주천 건천화 방지사업으로 인한 기대 효과로는 광주천 하천유지용수의 안정적 확보, 광주천 오염도 저하 및 수질기준 달성, 하천 생태계의 복원, 수변환경의 정화로 친수성 증대, 하수처리장 방류수의 이용으로 수자원의 효율적 이용 등을 들 수 있다. 2004년 8월에 발표한 「광주천정비 종합기본계획 보고서」에 따르면 광주천 하천 유지용수 확보방안으로 광주하수처리장 고도처리 최종 방류수를 100,000m³/일 확보하는 방안을 제시하였고, 도수로연장 19.3km, 관경 ϕ1,000mm의 관로공사에 의한 개략적인 사업비는 238억 원 정도로 산정되었고, 연간 유지관리비는 950백만원 정도 소요되는 것으로 제시되었다. 목표

수질은 BOD 기준으로 광주대교 지점 상부는 수질환경기준 Ⅱ등급, 하부는 Ⅳ등급으로 설정하였고, 상부 수질기준에 맞추기 위해서는 중수 처리공정이 추가로 필요하다. 광주천 유지용수 사업추진 예정공정은 송수관 건설이 2005~2008년까지이고, 펌프장건설이 2007년이다(광주광역시, 2000. 11, 2004. 8).

(4) 가좌하수처리장 방류수 이용 사례

인천광역시 동구에 소재한 INI스틸 인천공장은 연간 365만m^3 이상의 상수도를 냉각용수로 사용하고 약 40억원에 달하는 비용을 상수도 요금으로 지출하여 왔다. 이처럼 과다한 상수도 요금 부담과 가뭄 시 용수부족 문제를 해결하기 위하여 INI스틸에서는 인천시 가좌동 하수종말처리장의 방류수를 재처리하여 공업용수로 이용하기 위한 프로젝트를 추진하였다. 우선적으로 하수처리장 방류수를 공업용수로 이용하는데 필요한 방류수의 수질성상 분석, 수질조건을 만족시키기 위한 단위공정의 선정, 최적의 조합공정 선정 등을 위해 실내 실험과 Pilot를 운영하였다. INI스틸에 설치된 방류수 재처리시설은 다음과 같은 3단계로 구성되어 있다.

- 전처리 공정 : 부유물질 제거를 위해 응집처리 후, 디스크 드럼 필터(Disk Drum Filter)를 이용해 여과처리
- 와류식 다층여과(V-Filter) : 콜로이드 같은 미세부유물질 제거를 위해 미세모래를 이용한 와류식 다층여과처리
- 역삼투막(Reverse Osmosis) : 무기염류 등 제거를 위한 고도처리

이와 같은 재처리시설의 단계별 수질은 Table 13과 같으며, 최종 처리단계인 RO처리수에서는 SS, COD 등이 검출되지 않았다.

INI스틸은 2002년 9월 인천광역시와 가좌하수종말처리장으로부터 1일 16,000m^3의 방류수를 이용하는데 필요한 제반상황에 대해 협약을 체결하였고, 2002년 11월에 1일 12,000m^3의 공업용수를 생산할 수 있는 재처리시설 공사를 완료하여 현재가동중에 있다. 하수처리장 방류수를 재처리하기 위한 설비를 비롯하여 가좌하수종말처

리장에서 방류수를 공장까지 송수해오는데 필요한 배관공사(직경 500mm, 연장 1.5km)등에 총 76억원이 투자되었는데 INI스틸은 방류수를 공업용수로 이용함으로써 연간 약34억 5천만원의 상수도 요금을 절약하는 효과를 얻고 있다. 연간 재처리 시설 운영에 13억 44백만원이 소요되어 생산단가는 m^3 당 305원이며, 투자비 회수 기간은 2.13년으로 전망하고 있다.

Table 13. Water quality of treated sewage water in INI steel company of Incheon

항 목	철강용수	방류수	DDF	V-FILTER	RO	적합성
pH	6.5~7.5	6.8	6.8	-	7	적합
SS(mg/l)	5이하	20	20	<6	ND	적합
COD(mg/l)	6이하	11	11	1이하	ND	적합
EC(㎲/cm)	300이하	1219	1219	-	40	적합
Cl^-(mg/l)	50이하	456	456	-	13	적합

나. 외국의 하수처리수 이용 사례

(1) 일본의 하수처리수 이용 예

일본에서는 하수처리수를 이용하기 위한 시설을 건설하여 화장실 수세용수 등의 잡용수로 공급하는 광역 물순환 사업이 여러 도시에서 행해지고 있는데. 여기서는 천엽시(千葉市), 신호시(神戶市), 복강시(福岡市)의 예를 소개하고자 한다.

(가) 천엽시(千葉市)의 하수처리수 이용 사업

천엽현(千葉縣)은 확보 가능한 수원이 부족한 상태에서 막장지구(幕張地區)에 새

로운 도심(都心)을 건설하여 과밀한 동경(東京)의 기능을 흡수하고자 하였는데, 인접지구에 있는 화견천(化(見川) 하수종말처리장의 처리수를 신도심의 수세용수 등으로 순환이용하게 되었다. 하수처리수의 공급구역 면적은 0.62㎢(계획1.1㎢)로 막장(幕張) 신도심 지구의 견본시회장(見本市會場), 상업빌딩, 호텔, 업무빌딩, 그밖에 구역 내에 설치된 공원의 정원에도 공급되었다. 하수처리수의 공급능력은 4,120m^2/일이었고, 일 최대 공급실적은 2,372㎥/일이었다. 1989년 10월에 공급 개시가 이뤄졌으며 하수처리수의 추가처리시설은 화견천 하수종말처리장내에 설치되었다. 화견천 처리장의 2차 처리수(표준활성슬러지법 처리수)를 원수로 하여 응집침전, 급속여과, 오존산화, 염소주입의 순서로 처리하여 공급하고 있다. 수질은 Table 14에 나타낸 바와 같다. 하수처리수의 공급은 펌프 압송식으로서 하수처리수를 공급받는 빌딩의 저수조로부터 저수위의 신호를 받으면 펌프가 작동되어 하수처리수가 압송되는 구조로 되어 있다. 하수처리장으로부터 가장 멀리 있는 빌딩은 2.76km에 위치해 있으며, 배수관의 구경은 100～300mm이며 관종은 덕타일 주철관이다. 하수처리수의 이용요금은 210엔/㎥으로 종량제이며, 공급받는 빌딩이 공공시설일 경우 요금이 절반으로 줄어든다. 1998년 하절기까지 하수처리수 이용으로 인한 문제는 발생하지 않았다.

(나) 신호시(神戶市) 육갑(六甲) 아일랜드 물 순환사업(循環事業)

신호시도 확보 가능한 수원이 부족한 도시이지만, 항만기능의 강화 및 확대를 위해 조성한 매립지에 새로운 직주근접(職住近接)의 업무지구를 설치하면서 건너편 해안의 동탄(東灘)하수처리장과 육갑 아일랜드 내에 있는 리사이클 센터에 중수 시설이 각각 설치되어 있다. 동탄하수처리장에서는 2차 처리수(활성오니법)에 급속여과처리를 행하여 리사이클 센터로 압송한다. 리사이클 센터에서는 오존 처리와 염소처리 추가를 행한 후 각 수요처로 공급한다. 수질은 Table 14에 나와 있는 바와 같다. 공급은 펌프 압송방식으로서 배수관의 총연장은 6km이고, 배수관의 직경은 50～300mm, 재질은 경질염화비닐관 및 주철관이 이용되고 있다. 하수처리수의 이

용 요금은 업무용인 경우 200엔/㎥, 일반용은 120엔/㎥으로서 종량제를 따르고 있다. 살수용수의 수요가 계절적으로 변동이 심할 뿐만 아니라 시설용량이 정상적인 이용수량을 크게 상회함으로서 경영상의 문제를 안고 있는 실정이다.

(다) 복강시(福岡市) 하수처리수 이용 사업

복강시에서는 1978년에 겪은 혹독한 가뭄경험을 계기로 중심시가지부터 순차적으로 광역순환방식에 의한 잡용수도의 건설이 추진될 수 있었다. 1997년 현재 공급구역면적은 7.7㎢이고 건물의 연상면적이 3,000㎡이상이거나 급수관의 관경이 50mm이상인 건물을 대상으로 하수처리수의 공급을 행하고 있다. 하수처리수량은 4,500㎥/일이고, 일 최대 실공급 수량은 3,900㎥/일이었다. 1980년 6월에 공급이 개시되었으며, 공급능력은 400㎥/일, 공급받는 수요처는 3개소였다. 하수처리수의 추가처리시설은 중부(中部)하수처리장에 설치되었으며, 중부하수처리장의 2차처리수(A/O법 처리수)를 원수로 하여 급속여과, 오존처리, 염소주입의 순서로 처리하여 공급하고 있다.

Table 14. Water quality of sewage treated water according to cities in Japan

이용 개소 / 항 목	千葉縣 幕張 新都心			神戶市 六甲 아일랜드			福岡市		
	계획 수질	공급 수질	도달 수질	계획 수질	공급 수질	도달 수질	계획 수질	공급 수질	도달 수질
대장균수(개/mL)	-	ND	-	ND	ND	-	<10	<10	<10
잔류염소(mg/L)	검출	1.4	≤0.5	검출	0.04	-	검출	3.1	1.2
BOD(mg/L)	≤7	1.3	-	≤10	4.6	-	-	2.6	2.5
COD(mg/L)	≤7.7	4.8	-	-	10.1	-	-	7.1	7.0
SS(mg/L)	≤3.3	0.6	-	-	-	-	-	<2	<2
탁도(도)	≤3	미측정	-	≤10	-	-	-	1	<1
색도(도)	≤8	5	-	-	-	-	-	4	4
냄새	-	-	-	-	-	-	快	快	快
pH	-	-	-	5.8~8.6	-	-	-	7.5	7.5
T-N(mg/L)	-	15	-	-	31.8	-	-	20.1	19.1
T-P(mg/L)	≤0.8	0.06	-	-	0.58	-	-	0.97	0.91
ABS(mg/L)	≤0.06	미측정	-	-	-	-	-	-	-

수질은 Table 14에 나타낸 바와 같으며, 공급은 가압탱크에 의한 압송방식으로 배수관의 총연장은 48km이다. 배수관의 직경은 75~300mm이고, 관종은 모르타르 또는 에폭시 라이닝 덕타일 주철관이 사용되고 있다. 하수이용 요금은 총량 누진제를 따르고 있으며 평균적으로 356엔/㎥이다.

(2) 미국의 하수처리수 이용 사례

(가) 호노울리울리 방류수 재처리시설(오아후섬)

오아후섬 서남부 에바 지역에 있는 Honouliuli Wastewater Treatment Plant (WWTP)는 호놀룰루시가 운영하는 하수처리장으로서 약 307㎢ 지역에서 발생하는

하수를 차집해 처리하고 있다. 이 처리장은 1984년 11월 운영을 시작했으며, 당초에는 94,600㎥/일의 하수 처리능력을 갖추어 1차 처리 후 Mamala만 서쪽 심해를 통해 방류했고, 그 이후 143,800㎥/일 규모로 시설을 확장하였다. 하수처리는 전처리, 1차 처리, 2차 처리, 방류수 스크리닝, 고형물 처리, 냄새제거 등의 공정으로 이루어지고 있다. 이 처리장에서의 방류수 이용 과정을 살펴보면, Honouliuli WWTP의 2차 처리시설은 하와이주 보건국과 호놀룰루시 간에 1993년 체결된 하와이주 보건국 협약에 의해 시설되었으며, 협약의 주된 목적은 호노울리울리 하수처리장에 2차 처리시설을 설치하여 하수를 이용하는 것이며, 1996년에 호노울리울리 하수처리장에 2차 처리시설이 설치되었고, 1998년부터 약 7,500㎥/일을 이용하기 시작하였다. 게다가 1995년 연방정부 환경보호청(EPA), 하와이주 보건국(DOH), 호놀룰루시 간에는 309 Consent Decree로 알려진 협약에 합의하였는데, 이 협약은 호놀룰루시 정부가 하수처리장의 시스템을 개선하는 것을 이행토록 하고 있다. 이에 따라 호놀룰루시 정부에서는 2001년 7월까지 하수처리장 방류수를 이용할 수 있는 시설을 설치해야 했는데, 1998년 1월 공사에 착수하여 2000년 여름에 준공하였고, 8월부터 가동하기 시작하였다. 방류수 재처리시설은 Honouliuli 하수처리장 부지에 설치되었으며, 약 577억원이 소요되었고, US Filter Operating Services에서 시공하였다. 재처리 시설로는 재사용 펌프장, 모래여과 시설(급속 혼합조와 응집조), 자외선 소독장치, 마이크로여과 및 역삼투막 설비동, 저장탱크, 공급펌프장으로 구성되어 있다.

1일 45,400㎥/일의 방류수를 처리할 수 있는 능력을 갖추고 있으며, 이 시설에서는 농업용수로 적합한 R-1수와 공업용으로 사용할 수 있는 역삼투막 처리수(RO)를 생산하고 있다. R-1수는 1일 37,800㎥을 생산할 수 있는데, 이 물은 현재 골프장(West Loch, Ewa Villages, Hawaii Prince, Coral Creek 등), 조경 및 농업용으로 사용하고 있다.

(나) 키헤이 재처리시설(마우이섬)

Kihei 지역은 건조한 마우이섬의 남부지역에 위치하고 있으며, 이 지역의 상수도

는 Wailuku 근처에 있는 Iao 대수층에 개발된 관정으로부터 채수된 지하수를 16km가 넘는 송수관을 통해 공급받고 있다. Kihei 하수종말처리장은 활성슬러지 처리방식의 처리장으로서 건기 피크시 처리용량은 1일 30,280㎥이다. 이 처리시설은 응집조, 화학물질 투입조, 방류수 여과장치, 자외선 소독장치, 운전동 등에 대한 개수와 시설보완이 이루어져 하와이주 보건국의 R-1수 수질기준에 적합한 고수질의 방류수를 생산하고 있다. 과거에 마우이군은 Kihei 하수처리장으로부터 생겨나는 방류수를 개별 사용자에게까지 운송해 주는데 많은 비용이 소요되기 때문에 사용자를 찾는데 많은 어려움을 겪었으나, 고지 저류조와 송수시설 등을 포함하는 방류수 이용시스템이 건설되어 이를 이용하고자 하는 사람들의 요구를 충족시킬 수 있게 되었다. 현재 Kihei 하수종말처리장에서 처리되는 하수의 40~50%인 1일 6,056~7,570㎥의 방류수가 골프장 관개용수 및 조경용수 등으로 이용되고 있고, 나머지 방류수는 하수처리장 부지에 설치된 주입정(injection wells)을 통해 지하수로 함양되고 있다.

(다) 캘리포니아주 오렌지카운티 『Water Factory 21』의 사례

캘리포니아주 남부에 위치한 Orange County는 2,067km²의 면적에 298만명(2003년 1월 현재)이 거주하고 있으며, 연평균 강우량이 330~380㎜ 밖에 안 되기 때문에 지표수의 발달이 미약하여 대부분의 용수를 지하수에 의존하고 있다. 지하수를 농업용수로 사용하기 위해 과다한 채수가 진행된 결과, 1956년에 지하수위가 해수면 아래로 내려가게 되었고, 해안에서 8㎞ 내륙 지역까지 해수가 침투되어 지하수가 염수화되는 일이 발생하였다. 이에 대한 대책으로서 담수를 대수층에 강제로 주입하는 방법(Costal Barrier Project)이 시행되었지만 효과를 거두지 못하자 해안으로부터 약 3.2㎞ 떨어진 지점에 7개의 관정을 뚫어 해수가 포함된 지하수를 퍼 올려 바다로 배출시키는 사업을 전개함과 동시에 6.4km 떨어진 내륙에 23개의 인공함양정을 183m 간격으로 설치, 담수를 주입해 해수침투를 방지하기 위한 계획이 마련되었다. 함양용수로는 하수처리장 방류수를 재처리(고도처리)한 것과 심정에서

채수한 지하수를 혼합해 사용하는 것으로 최종 결론을 내리고, 함양용수를 생산해 내는 고도처리시설을 『Water Factory 21』로 명명하였으며, 1976년 10월부터 방류수를 재처리하여 지하수 인공함양을 시작하였다. 오렌지카운티가 함양용수로 하수처리장 방류수를 재처리하기로 결정한 이유는, 매년 18,503천㎥(1일 50,690㎥)의 방류수가 바다로 무의미하게 방류되어 이용 할 수 있는 수자원이 낭비되고 있고, 방류수를 재처리하여 이용할 경우, 콜로라도강과 주정부에 의존하고 있는 용수량을 감소시킬 수 있었기 때문이다. 또한, 극단적인 가뭄이나 비상사태가 발생해 콜로라도강과 주정부로부터 공급받는 수량이 감소하게 될 경우, 해수침입 방지를 위한 인공함양사업의 경우는 차질을 가져올 수 있지만, 하수처리장 방류수를 이용할 경우는 거의 일정하게 공급할 수 있으므로 그러한 위험성이 없어졌기 때문이다.

제3장 실험 및 장치

제1절 수질조사

1. 수질측정

광주하수처리장 유입수와 방류수의 수질을 파악하기 위하여 2004년 1월부터 2004년 12월까지 매월 수질을 분석하고, 시간별, 계절별 수질변화를 조사하였다. 유입수의 채취지점은 스크리닝 바로 직후이고, 방류수의 채취지점은 최종침전지 말단부의 월류웨어이다.

조류조사는 2004년부터 2005년 6월까지 조사하였다. 최종 방류수에 대한 응집, 흡착 및 막분리 실험을 실시하고, 염소소독의 영향을 피하기 위하여 소독공정 이전에 채수하였다.

2. 분석방법

수질조사 항목은 현장측정은 수온, pH, DO, 전기전도도 등이고, 실험실 측정은 BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P, 색도(colority), 총대장균군(E. Coli), Cl^-, 경도, Fe, Hg, As, Pb, Cd, Cr 등이며, 총 22개 항목이다. 그리고 하루 중 수질의 변화를 조사하기 위해 1시간 간격으로 수질을 조사하여 처리효율을 비교분석하였다.

방류수의 처리실험은 응집공정, 흡착공정, 막분리 공정에 대해서 단위공정별로 처리효율을 조사한 후, 연속처리 실험의 처리효율을 조사하였다. 단위공정별 실험은 응집공정은 쟈-시험(Jar-test)를 사용하여 실험하고, 흡착실험은 회분식 반응조를 이용하여 흡착평형실험을 실시하여 색도, 유기물 등의 처리효율을 조사하였으며, 막분리 실험은 MF막을 사용하여 막의 오염과 세척 등을 조사하였다.

응집, 흡착 및 막분리 공정이 조합된 연속처리실험을 실시하여 최적운전조건을

모색하고 현장적용 가능성을 검토하였다.

하수처리장 방류수와 공정별 처리수의 수질분석은 수질오염공정시험법에 의하여 실시하였으며, 항목별 시험방법을 Table 15에 나타내었다.

중금속은 ICP-MS(Agilent-7500A, USA), T-P 및 T-N은 T-N/T-P Automatic Analyzer (AACS Ⅲ, BRAN-LUEBBE, Germany), pH는 pH-meter(520-A, ORION, USA)를, 탁도는 탁도계(2,100AN, HACH, USA), 전기전도도는 전기전도도계 (NeoMet-40C Istek, Korea), 색도는 색도계(TC-205, CENTRAL KAGAKU, Japan), TOC는 TOC분석기(Phoenix-8000, TEKMAR- DOHRMANN, USA)를 사용하였으며, 기타 항목은 분광광도계(UV-1201, Shimadzu, Japan)를 사용하였다.

Table 15. Analytical methods for searching water quality of sewage water

Items	Analytical methods
BOD	Azide Modification Method
COD_{Mn}	Closed Reflux Titrimetric Method
SS	Gravimetric Method(Glass fiber, Dried at 105~110℃)
T-N	Ultraviolet Spectrophotometric Method
T-P	Ultraviolet Spectrophotometric Method(Ascorbic Acid Reduction)
NH_3-N	Ultraviolet Spectrophotometric Method
NO_3-N	Ultraviolet Spectrophotometric Method
NO_2-N	Ultraviolet Spectrophotometric Method (Diazotiation)
PO_4-P	Ascorbic Acid Reduction Method
Metals	ICP-MS
Color	Spectrophotometric Method
Turbidity	Nephelometric Method

분자량 분포의 측정에 사용한 HPLC- DAD(Agilent 1,100)를 Fig. 2에 나타내었다. Protein pack(Waters, Protein Pak 125) 칼럼을 사용하고, 이동상으로는 pH 6.8, 0.1M 이온강도의 4mM phosphate 완충용액을 사용하였다. 이동상 내의 기포를 제거하기 위하여 아르곤 가스를 이용하여 약 15분정도 air sparging을 실시하고, 시료

분석시 칼럼온도를 약 40℃로 유지하였다. 시료의 분석에 앞서 사용된 표준시료는 PSS(polystyrene sulfonates, Polysciences, Inc.)로서 분자량은 각각 210, 1,800, 4,600, 8,000 및 18,000 dalton이며, 체류시간(retention time)과 분자량의 검정곡선을 이용하여 시료의 분자량 분포를 측정한다.

Fig. 2. High performance liquid chromatography system(SEC)

3. 조류의 채집 및 분석

시료는 2004년 4월(봄), 11월(겨울), 2005년 3월(봄), 6월(여름) 등 총 4회 채집하였으며, 2005년 6월 채집시에는 냄새의 원인을 찾고자 최종침전지 벽면에 붙어 있는 이물질을 동시에 채집하였다.

플랑크톤의 채집은 Net(직경 30㎝, 길이 100㎝ : mesh pore size 25㎛)를 끌어 정성채집하고, 시료 20ℓ를 채수하여 동일한 채집망으로 100㎖로 농축하여 정성채집 시료에는 고정액을 넣지 않고, 정량채집시료는 3~5% 포르말린 용액으로 고정시킨 후 실험실로 운반하여 분석하였다. 정성채집의 경우 포르말린 고정 시 조류, 원생동물, 윤충류 등의 종 동정이 어렵기 때문에 고정액을 넣지 않았다.

정성채집시료는 위상차현미경(Carl Zeiss Model Jenaval, Olympus BX 51)으로 관찰하고, 종을 동정한 후 생물량 1㎖를 취하여 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 계수하였다.

분류체계는 Hirose 등과 Simonsen의 체계를 따랐고, 한국 동식물도감, 한국 담수조류도감, 일본담수조류도감, 수도조류분류해설, 일본의 수도생물, 담수조류 사진집을 참고하여 동정 분류하였다.

4. 공정별 실험

가. 응집실험

하수처리장 방류수의 응집실험은 가장 적절한 응집제를 선정하고 적절한 주입량을 파악하기 위하여 실시하였다. 사용된 응집제는 Alum과 PAC(poly aluminium chloride)이며, 처리실험 후 시료를 GF/C 여지로 여과하여 여과 전, 후의 pH, 색도, 탁도, TOC(total organic carbon) 및 T-P 등을 조사하였다.

나. 흡착실험

흡착공정에 사용할 활성탄을 선정하기 위하여 U사(Union carbon co.)의 야자계와 석탄계 2가지 활성탄에 대한 비표면적, 세공분포, 세공용적 등 물리화학적 특성을 BET (Brunauer-Emmett-Teller)장치를 이용하여 측정하였다. 활성탄의 평형흡착량을 구하기 위해 회분식 평형흡착실험을 실시하였으며, 단일성분의 흡착등온식으로서 Freundlich식을 사용하여 실험결과를 모사하였다. 비교항목은 TOC, UV-254, 색도 등이고, 하수처리장 방류수와 흡착실험한 처리수의 분자량분포를 측정하여 공정별 분자량의 제어 범위를 파악하였다.

다. 막분리 실험

정밀여과(microfiltration) 공정에서 투과유속의 감소는 대부분이 막의 세공경(pore size)과 유사한 콜로이드성 유기물의 막음현상에 의해 이루어지므로, 막분리 공정 이전에 응집공정이나 분말활성탄 등의 전처리공정이 선행되면 막오염

(Membrane fouling)의 원인 유기물을 제거하는데 매우 효과적일 것으로 판단된다. 방류수 원수를 정밀여과 하였을 경우 막오염의 특성을 파악하기 위해 ① 압력의 변화, ② 막의 세척에 대한 영향 등의 연구를 실험실의 소규모 플랜트에서 실시하였다.

라. 응집-흡착-막분리 연속처리실험

응집-막분리 공정 및 응집-흡착-막분리 공정에 대한 처리효율을 비교하기 위해 Lab-scale pilot plant를 사용하여 실험하였다. 응집·침전조의 용량은 60 L이고, 막공정의 반응조 용량은 5L이며, 처리량은 100mL/min 범위 내에서 실험 여건에 맞춰 실험하였다. 비교항목은 TOC, 색도, 탁도, T-P 및 중금속 등 이용수의 수질기준 항목을 중심으로 실시하였다. 또한, 하수처리장 방류수를 응집-흡착-막분리 공정으로 처리할 때 제거되는 유기물의 분자분포를 파악하기 위해 분자량변화를 조사하였다.

제2절 실험 및 재료

1. 응집실험

실험실적 규모의 응집실험은 Jar tester를 사용하는 자-실험이며, 실험 조건은 급속교반 5분, 완속교반 15분 및 정치(Settling) 60분이다(Fig. 3). 상등수는 Syringe를 이용하여 침전물의 요동이 없게 조심스럽게 채취한 후 실험하였다. 응집제는 액체황산알루미늄(Alum), 폴리염화알루미늄(Poly aluminium chloride), 염화철(Ferric chloride) 등을 사용하였고, 응집제 투입에 따른 색도, 탁도 등의 처리효율을 조사하고, 응집효율이 좋은 응집제를 선정하여 pH에 변화를 주면서 처리효율을 조사하였다.

Fig. 3. Jar-tester for coagulation process

2. 흡착실험

활성탄 흡착실험은 주로 유기물 제거효율을 파악하기 위해 수행하였으며 비표면적이 큰 분말활성탄을 사용하였다. 흡착공정은 생물학적 및 물리적 처리를 병행한 처리공정으로 이용되고 있다.

유기물의 흡착특성은 Freundlich 등온식에 근거하여 Freundlich 상수 k 와 n 값을 구하여 해석하였다. 평형실험은 300ml의 비이커를 사용하여 수욕조를 이용한 등온흡착실험을 실시하였고, 활성탄의 양을 변화시키면서 흡착평형능을 조사하였다. 흡착속도실험은 5L의 항온반응조를 이용하여 교반속도와 활성탄 투여량을 변화시키면서 실시하였다.

흡착공정을 최적화하기 위해서는 평형실험과 속도실험 data가 필요하다. 평형실험은 흡착제인 분말활성탄의 흡착능력 및 특성을 파악하는 기본적인 실험이며, 실제공정에 적용하는데 매우 유용한 정보를 제공한다.

평형실험은 TOC농도가 일정한 용액에 2가지 분말활성탄(Union Carbon co. - PWPL, PWWL)을 투입하여 비교실험을 실시하였다. 2가지 분말활성탄의 물리적 특성은, 야자계 활성탄의 경우 비표면적은 1,047㎡/g, 미세공경은 43.3Å, 세공용적은 0.58㎥/g 이고, 석탄계 활성탄의 경우 비표면적은 918㎡/g, 미세공경은 33.5Å, 세공용적은 0.56㎥/g 이다(Table 16).

Table 16. Physical properties of PAC

Specifications	Coconut based PAC (PWPL)	Coal based PAC (PWWL)
Surface area(m^2/g)	1,047	918
Mean pore Diameter(Å)	43.3	33.5
Micropore volume(m^3/g)	0.58	0.56

3. 막분리 실험

본 연구에 사용된 막은 폴리에틸렌 재질의 중공사막(Hollow fiber) 정밀여과 막으로서 막 표면에 친수성 물질이 coating된 오·폐수 처리용 막을 사용하였다. 세공경은 0.4㎛이고, 사용 pH영역은 2~11, 표준 Flux는 0.2~0.3 ㎥/㎡·day이며, 유효표면적은 1.5㎡/module이다. 내약품성이고 물리적 강도가 크며, 생산업체에서 제시한 막의 수명은 8년이다 (Table 17).

Table 17. Microfiltration membrane properties used in this study

종 류	막재질	세공경	유효표면적	pH	Flux	기 타
중공사막	Polyethylene	0.4㎛	1.5㎡/module	2~11	0.2~0.3 ㎥/㎡·day	친수성막표면

제3절 실험장치

응집-흡착-막분리 공정의 Lab-scale 실험은 Fig. 4에 나타낸 장치이며, 1일 처리 용량은 10～200L/day이다. 반응기의 용량은 급속혼화조 5L, 완속응집조 5L 및 침전조 60L이며, 수위의 자동 조절이 가능하다.

흡착-막분리 공정의 Lab-scale 실험은 혼합반응조를 사용하였고, 활성탄의 투입 여부에 대해서 비교하였다.

또한 흡착-막분리 공정의 Lab-scale 실험은 5L 용량의 Pyrex 비이커에 수위조절 장치를 부착하여 펌프가 자동으로 가동되도록 설치하였다.

세 가지 공정 모두 작동이 수위조절센서에 의해 자동으로 on/off되며, 침전지에 경사판을 설치하여 침전효율을 향상시켰다.

응집-흡착-막분리 연속공정의 운전인자는 각각의 단위공정 실험에서 얻어진 최적조건을 적용하였다.

Fig. 4. Experimental apparatus of small scale coagulation /adsorption/membrane

제4장 결과 및 고찰

제1절 하수처리장 유입수 및 방류수의 수질

1. 유입수의 수질

광주하수처리장 2단계 유입수의 2004년도 14개 항목의 수질분석자료는 Table 18과 같다.

Table 18. Water quality of sewage influent in 2nd stage of Gwangju Ⅰ plant

(unit: ㎎/L, 총대장균군 : 개/㎖)

항목	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균	최대	최소
BOD	171.0	78.0	270.0	195.0	306.0	312.0	100.0	198.8	86.0	144.0	98.0	106.0	172.1	312.0	78.0
COD	93.5	75.7	148.2	148.2	195.2	171.5	53.7	95.6	63.3	90.4	91.4	145.1	111.1	195.2	53.7
SS	141.8	120.0	355.0	295.0	446.7	188.0	180.0	334.3	156.0	140.0	256.0	210.0	235.2	446.7	120.0
NH_3-N	9.673	10.864	43.918	31.976	37.869	29.228	27.583	17.442	20.020	28.109	35.242	24.738	26.389	43.918	9.673
NO_2-N	0.046	0.022	0.013	0.037	0.004	0.044	0.149	0.154	0.015	0.004	0.043	0.188	0.060	0.188	0.004
NO_3-N	2.994	3.002	2.978	2.035	0.000	0.342	0.153	0.165	0.047	0.030	0.180	0.165	1.008	3.002	0.000
T-N	29.009	32.028	49.952	44.489	39.432	43.549	29.582	40.946	27.117	30.343	46.030	40.699	37.765	49.952	27.117
T-P	3.031	3.399	6.456	6.568	6.022	6.855	2.976	5.589	3.686	3.860	6.310	5.581	5.028	6.855	2.978
PO_4-P	1.887	2.956	5.194	4.053	3.360	4.021	2.076	3.220	2.159	2.860	3.408	3.673	3.239	5.194	1.887
DO	1.3	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.3	0.7	0.7	0.34	1.3	0.0
수온 (℃)	12.6	13.3	14.8	18.8	20.1	22.6	24.8	26.9	23.8	21.8	18.2	13.5	19.3	26.9	12.6
pH	7.0	7.1	7.1	6.8	6.8	7.0	7.2	6.6	7.7	7.4	7.6	7.4	7.1	7.7	6.6
Cond. (㎲/cm)	543	639	749	636	684	736	659	810	576	686	719	744	682	810	543
총대장균군	.	.	92,000	.	.	140,000	.	.	140,000	.	.	11,000	95,750	140,000	11,000

유입수의 수질은 BOD 78.0~312.0㎎/L(평균 172.1㎎/L), COD 53.7~195.2㎎/L(평

균 111.1㎎/L), SS 120.0~446.7㎎/L(평균 235.2㎎/L), T-N 27.117~49.952㎎/L(평균 37.765㎎/L) 및 T-P 2.978~6.855㎎/L(평균 5.028㎎/L)이었다. 유입수의 항목별 농도가 약간 높게 나타난 것은 연계처리수와 농축소화조 월류수가 유입되는 침사지에서 채수하였기 때문이다.

주요 오염물질의 월별 농도변화는 Fig. 5과 같다. 3월~8월에 SS, BOD 및 COD 농도가 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

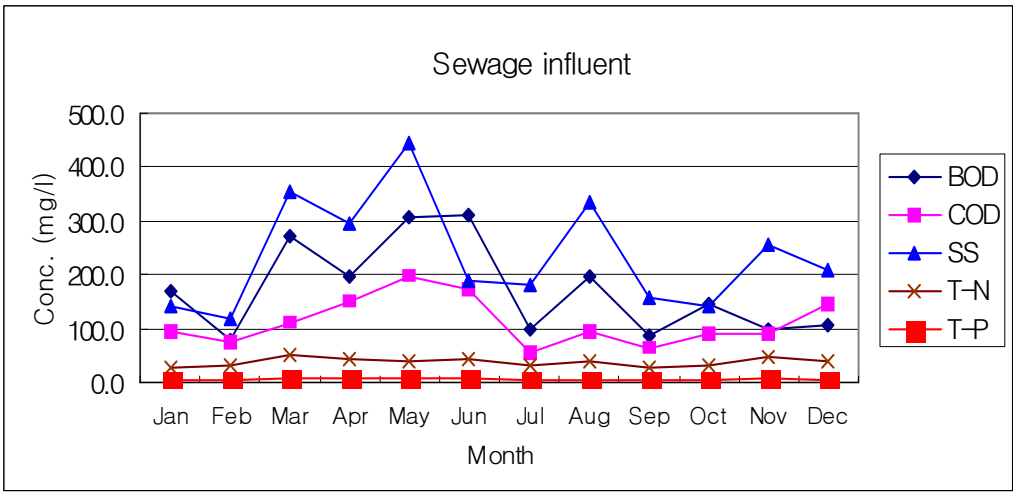


Fig. 5. Monthly variation of water quality in 2nd treatment plant

2. 방류수의 수질

광주하수처리장 2단계 방류수의 2004년도 22개 항목의 수질분석자료는 Table 19와 같다.

Table 19. Water quality of sewage effluent in 2nd treatment plant of Gwangju

(unit: ㎎/L, 총대장균군 : 개/㎖)

항목	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균	최대	최소
BOD	4.7	6.3	3.3	3.1	4.3	4.0	3.3	4.0	2.8	3.8	3.3	2.3	3.8	6.3	2.3
COD	8.0	11.3	12.3	9.9	12.6	9.5	7.8	7.0	7.5	8.4	8.8	9.6	9.4	12.6	7.0
SS	3.3	6.0	1.7	3.0	3.0	3.5	3.0	2.0	2.5	1.7	1.5	2.0	2.8	6.0	1.5
색도 (도)	23	32	23	30	29	25	25	25	24	24	28	27	26	32	23
탁도 (NTU)	0.6	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.5	0.7	1.3	0.8	0.9	0.8	1.3	0.5
냄새	유	유	유	유	유	유	유	유	유	유	유	유	유	유	유
외관	양호	양호	양호	양호	양호	양호	양호	양호	양호	양호	양호	양호	양호	양호	양호
잔류염소	0.4	0.3	0.5	0.2	0.8	0.8	0.4	0.4	0.2	0.3	0.3	0.2	0.4	0.8	0.2
대장균군	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
염소이온	75	77	64	92	85	85	83	79	59	77	89	133	83	133	59
T-P	0.970	2.612	1.112	2.708	2.059	2.694	1.500	1.795	1.066	1.825	1.320	1.724	1.782	2.708	0.970
T-N	20.722	21.207	19.293	20.759	22.835	21.693	15.237	17.976	15.802	18.350	21.820	19.267	19.580	22.835	15.237
ABS	0.01	0.77	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.08	0.10	0.77	0.00
경도	80	64	60	78	96	80	82	85	69	78	77	81	78	96	60
Fe	0.013	0.021	0.026	0.065	0.019	0.053	0.078	0.000	0.000	0.009	0.015	0.017	0.026	0.078	0.000
Mn	0.019	0.026	0.037	0.067	0.036	0.062	0.086	0.000	0.021	0.015	0.084	0.017	0.039	0.086	0.000
Hg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
수온 (℃)	11.7	13.2	15.6	19.1	21.7	23.0	25.6	27.2	24.6	22.5	18.1	14.5	19.7	27.2	11.7
pH	7.3	7.3	6.9	7.0	6.9	6.6	7.0	6.9	7.7	7.1	7.2	7.0	7.1	7.7	6.6
Cond. (㎲/㎝)	572	522	523	612	542	671	604	671	543	617	636	628	595	671	522

가. *BOD* 및 *COD*

2004년도 광주하수처리장 방류수의 BOD는 2.3~6.3㎎/L(평균 3.8 ㎎/L), COD는 7.0~12.6㎎/L(평균 9.4㎎/L)으로 월별 편차가 매우 크고 겨울철에 농도가 다소 높아지는 경향이 있다.

광주하수처리장의 처리공법은 표준활성슬러지법을 채택하고 있어서 미생물에 의

한 생물학적 처리 효율이 유입수에 대한 유출수의 유기물 처리에 직접적으로 영향을 미친다고 볼 수 있다. BOD/COD 비율은 40.4%로서 많은 양의 유기물이 미생물에 의해서 제거되고 있음을 알 수 있다.

BOD와 COD는 방류수 수질기준과 중수 수질기준에 적합하지만, 영산강수계가 2004년 1월 1일 이후 특정지역기준의 적용을 받게 되므로 장래에는 수질오염총량제 실시에 대비하며 중수로 이용가능한 수질을 확보하기 위해서는 적절한 수질관리가 요구된다. 따라서 하수처리장 방류수를 중수로 사용하기 위해서는 중수의 용도에 따라 활성탄 흡착이나 막분리 등의 후속처리가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

2004년도 BOD와 COD의 월별 농도변화는 Fig. 6과 같다.

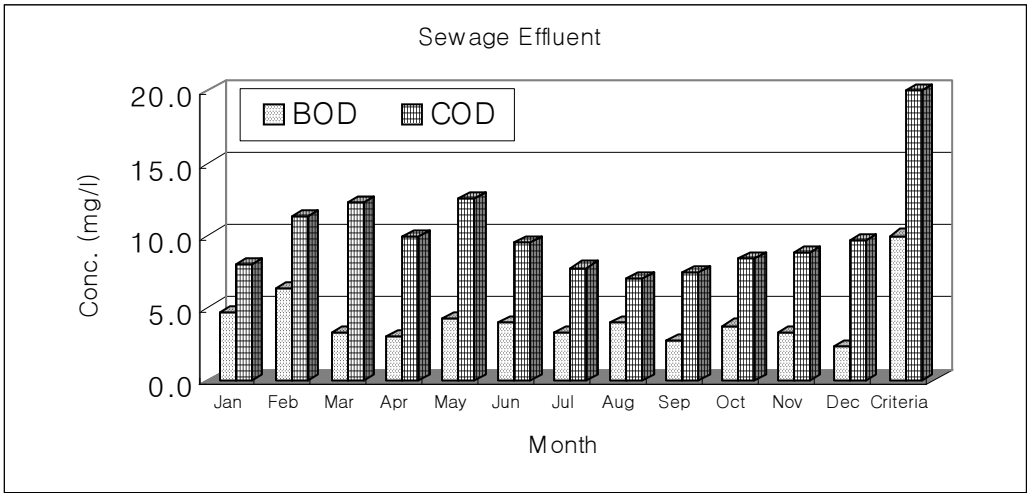


Fig. 6. Monthly variation of BOD, COD in 2nd treatment plant

나. 심미적 물질

심미적 물질은 시각, 후각 등 감각적으로 느끼는 물질들로서 중수 수질기준에 비해 매우 민감한 항목들이다. 특히 후각적인 부분은 더욱 민감하여 완벽하게 처리한 후에 중수로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

(1) 색도(Color)

2004년도 색도는 23~32도(평균 26도)로서 중수 기준에 부적합한 것으로 조사되었다(Fig. 7). 중수는 이용하는 과정에서 사람의 손에 의한 접촉되므로 색깔에 의한 혐오감을 느끼지 않도록 중수 기준보다 훨씬 낮은 수질관리가 요구된다. 색도 물질인 휴믹산이나 펄빅산 등의 유기물을 제거하기 위해서는 응집, 활성탄 흡착, 막분리 공정과 같은 적절한 처리공법의 도입이 필요하다.

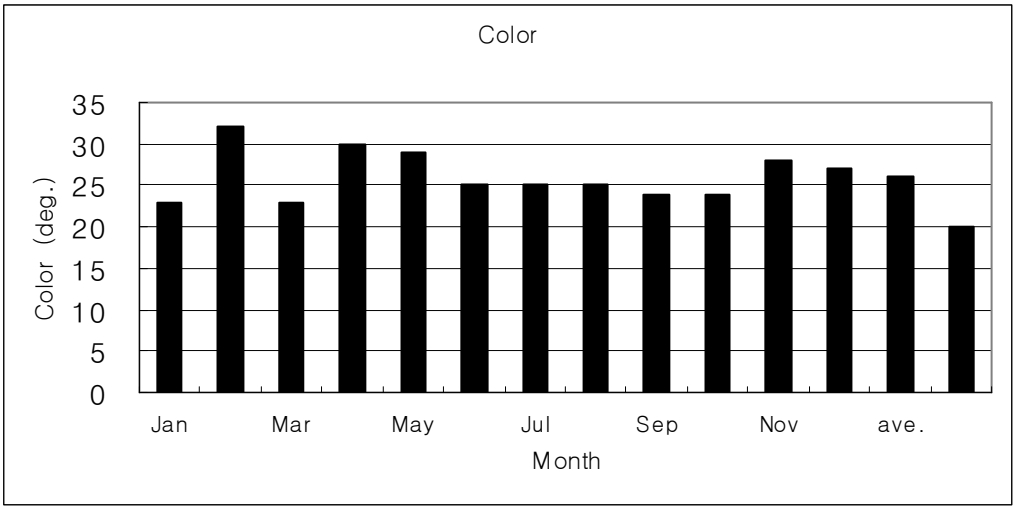


Fig. 7. Monthly variation of color in 2nd treatment plant

(2) 탁도(Turbidity)

2004년 광주하수처리장 방류수의 탁도는 0.5~1.3 NTU(평균 0.8NTU)로서 중수의 수질기준인 2 NTU를 초과하지 않음으로써 중수 수질기준에 적합하다.

하수처리장 방류수를 중수로서 이용할 경우에는 강우시 탁도가 증가하는 점을 고려하고, 가능하면 먹는물 수질기준에 적합하게 처리하는 것이 바람직하다. 이를 위해 응집공정이나 막공정을 도입하는 것이 매우 효과적일 될 것으로 예상된다(Fig. 8).

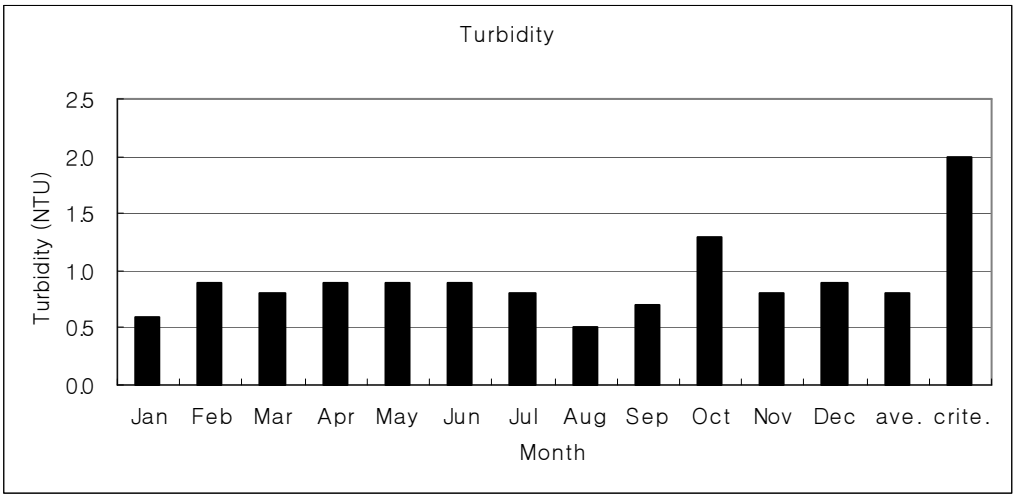


Fig. 8. Monthly variation of turbidity in 2nd treatment plant

(3) 냄새와 맛

광주하수처리장 방류수중에는 약간 불쾌한 냄새가 남아 있어서 방류수를 중수로 이용할 경우 냄새물질의 제거여부가 중요한 결정변수이다.

방류수 중의 이취미를 제거하기 위해 활성탄흡착, 분리막 공정 등의 도입이 바람직할 것으로 예상된다.

다. 중금속

2004년 광주하수처리장 방류수의 중금속농도는 이·취미에 영향을 미치는 Fe농도가 0.000～0.078㎎/L(평균 0.030㎎/L), Mn농도가 0.000～0.086㎎/L(평균 0.040㎎/L)로 저농도로 나타났으며, 유해 중금속인 수은, 비소, 납, 카드뮴, 크롬은 전혀 검출되지 않았다.

방류수의 중금속농도가 먹는물 수질기준을 충족시키고 있으므로, 방류수를 중수로 이용할 경우 중금속을 제거하기 위한 별도의 공정은 불필요하다고 사료된다(Fig. 9).

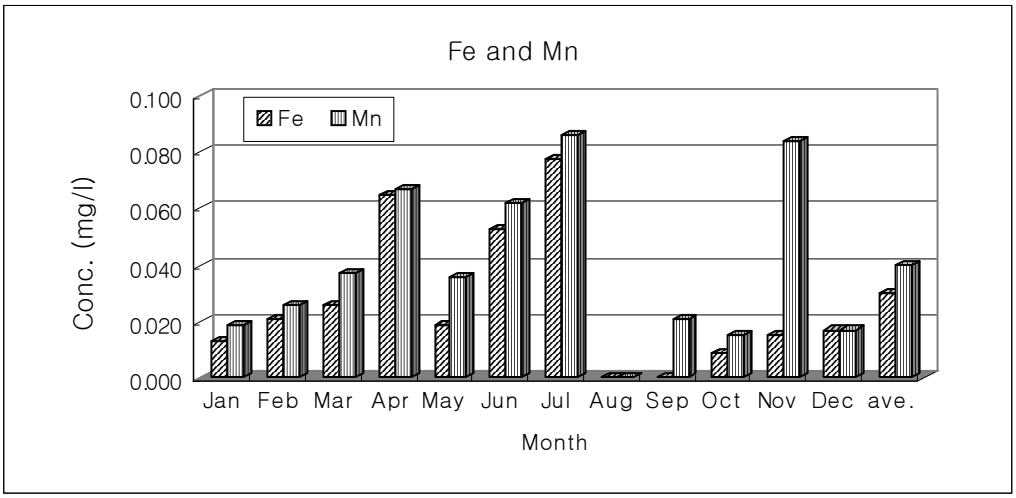


Fig. 9. Monthly variation of Fe and Mn in 2nd treatment plant

라. 기타 물질(*pH*, 경도, 염소이온, 전기전도도 등)

pH는 6.6~7.7(평균 7.1), 염소이온은 59~133 ㎎/L(평균 83 ㎎/L), 경도는 60~96 ㎎/L(평균 78 ㎎/L), 전기전도도는 522~671㎲/㎝(평균 595㎲/㎝)이었다. pH, 염소이온, 경도 등이 모두 중수 수질기준에 적합하였다.

이들 항목들은 관로에 생성되는 스케일, 부식 등과 관련되므로 먹는물 수질기준을 유지하는 것이 바람직하다. 방류수의 수질이 먹는물 수질기준을 충족시키고 있으므로 방류수를 중수로 이용할 경우 이들을 처리하기 위한 별도의 공정은 불필요하다고 사료된다(Fig. 10, 11).

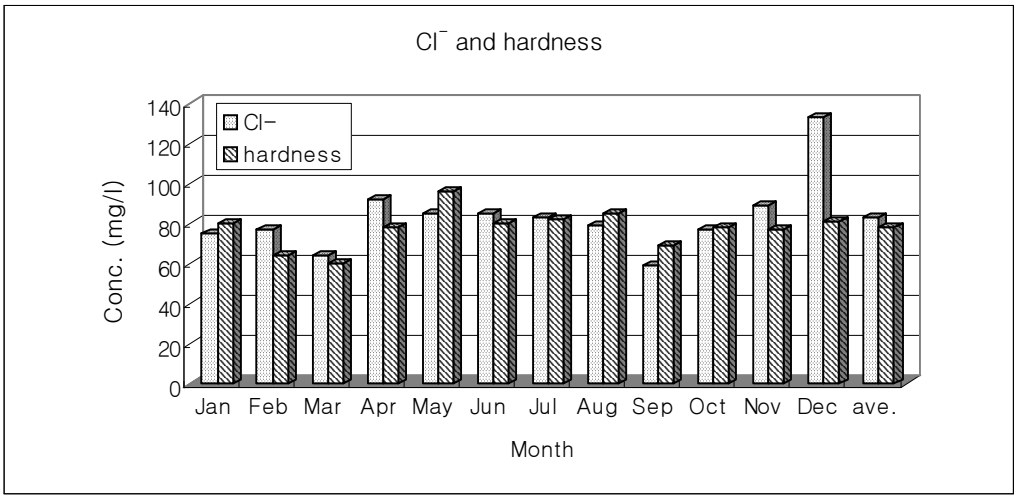


Fig. 10. Monthly variation of Cl^- and hardness in 2nd treatment plant

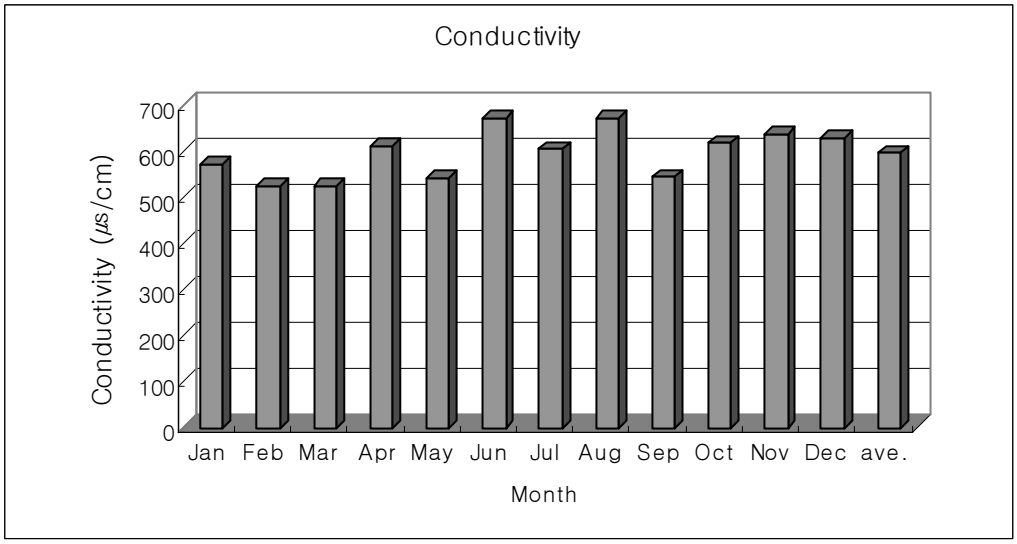
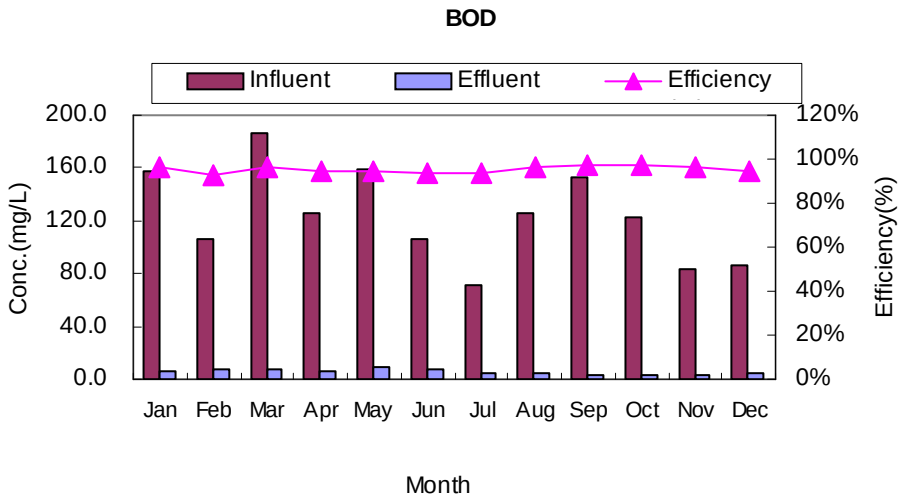
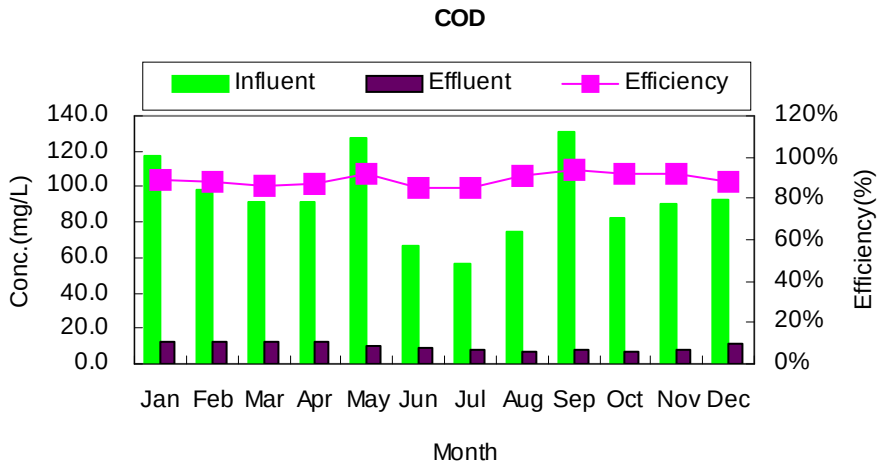


Fig. 11. Monthly variation of conductivity in 2nd treatment plant

3. 유기물, SS 및 영양염류의 처리효율

2004년 광주하수처리장 2단계 시설의 유입수 대비 방류수의 처리효율은 BOD 97.8 %, COD 91.5 %, SS 98.8 %, T-N 47.9 %, NH_3-N 47.5 %, T-P 63.6% 및 PO_4-P 47.3 %이었다(Fig. 12).





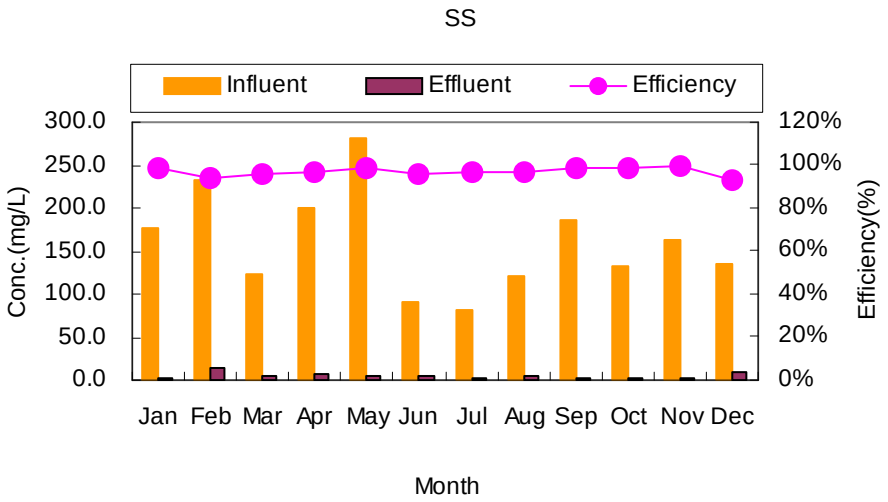
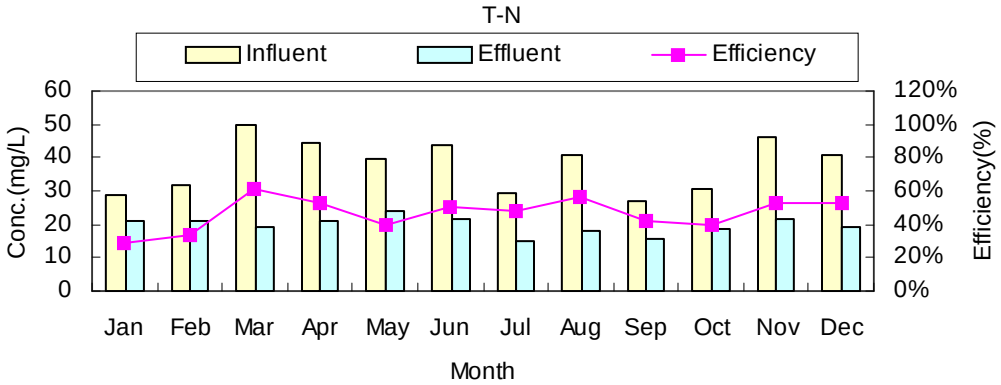
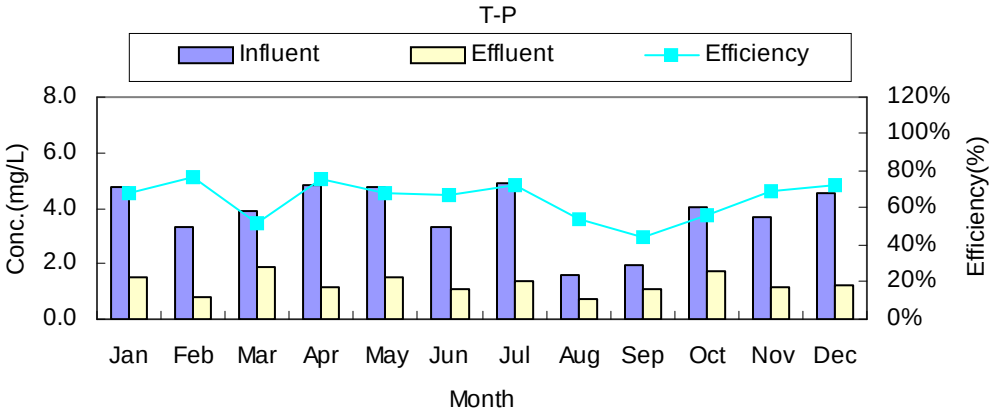


Fig. 12. Treatment efficiencies of BOD, COD, and SS in sewage treatment plant

현재 하수처리장에는 영양염류를 제거하기 위한 고도처리시설이 설치되지 않았기 때문에 영양염류의 처리효율이 BOD, COD, SS와 비교할 때 낮은 편이다. 고도처리공정의 도입이 추진되고 있으므로 설치된 후에는 인과 질소의 처리효율이 향상될 것으로 전망된다.(Fig. 13).



(a) Removal rate of total nitrogen in sewage water



(b) Removal rate of total phosphorus in sewage water

Fig. 13. Treatment efficiencies of T-N and T-P in sewage treatment plant

4. 수질의 계절별 특성

2004년 광주하수처리장 2단계 방류수의 계절별 특성은 유기물(BOD, COD, 색도)은 대체적으로 동절기인 2~5월 중에 높고 하절기인 7~10월경에 낮게 나타났다. 철과 망간은 4~7월에 높고, 8~10월에 낮게 나타났다. 전기전도도는 계절적인 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

5. 수질의 시간대별 특성

2004년 광주하수처리장 2단계 유입수와 방류수의 시간대별 수질변화를 조사한 결과 유입수의 시간대별 농도변화가 크고, 항목 전반적으로 오후 12시~16시 사이가 농도가 높으며, 새벽시간대인 4시~7시 사이에 농도가 낮은 것으로 나타났다.

방류수의 시간대별 농도변화가 적어서 안정적으로 처리되고 있음을 알 수 있다. 유입수의 시간대별 농도는 BOD 94.2~162.6㎎/L(평균 130.2㎎/L), COD 65.3~94.2

㎎/L(평균 74.9㎎/L), SS 54.0～168.0㎎/L(평균 107.1㎎/L), T-N 22.206～36.933㎎/L(평균 28.439㎎/L) 및 T-P 1.912～3.809㎎/L(평균 2.846 ㎎/L)이며, 총대장균군은 28,000～300,000개/ml(평균 131,667개/ml)로 나타났다.

유입수의 BOD농도가 높은 시간대는 오후 1시, 오후 4시 및 밤 10시경으로 대체로 아침, 점심, 저녁 식사 후 4시간 정도 지난 시간대에서 높게 나타났다. 반면에 가장 낮은 시간대는 새벽 4시～6시경이었다.

COD/BOD 평균비율은 57.5%, SS/BOD 평균비율은 82.3%로서 생분해성 유기물이 다량 포함되어 있음을 알 수 있다(Table 20).

방류수의 유기물 농도는 BOD 2.0～5.3㎎/L(평균 3.7㎎/L)로서 유입수 농도 대비 처리효율은 97.2%이고, COD농도는 8.0～9.7㎎/L(평균 8.9㎎/L), 처리효율은 88.1%이었다. SS농도는 1.0～4.3㎎/L(평균 2.0㎎/L), 처리효율은 98.1%로서 높은 처리효율을 보였다. T-N농도는 21.380～23.893㎎/L(평균 22.531㎎/L), 처리효율은 20.8%, T-P농도는 1.853～2.317㎎/L(평균 2.067㎎/L), 처리효율은 27.4%로 나타났다. 총대장균군은 56～2,200개/ml(평균 924개/ml)로서 전시간대에 걸쳐 낮게 나타났고, 방류수수질기준에도 적합하였다.

Table 20. Hourly variation of items of influent and effluent in 2nd treatment plant of Gwangju (단위: ㎎/L 단, 총대장균군:개/㎖)

항 목 / 시간대	BOD		COD		SS		T-N		T-P		총대장균군	
	유입수	방류수	유입수	방류수	유입수	방류수	유입수	방류수	유입수	방류수	유입수	방류수
2004.12.7 10hr	113.4	5.2	75.0	9.3	142.0	2.4	31.925	21.804	3.482	1.910	300,000	800
11hr	136.2	5.3	81.0	9.6	122.0	2.6	33.595	21.911	3.495	1.904	110,000	1,100
12hr	153.0	5.2	85.0	9.6	154.0	2.3	36.933	22.063	3.809	1.925	230,000	800
13hr	162.6	5.0	87.2	9.3	110.0	2.0	35.258	22.090	3.624	1.935	130,000	600
14hr	141.3	5.0	75.8	9.7	154.0	2.2	30.179	21.757	3.143	1.948	210,000	250
15hr	126.6	4.4	76.0	9.6	124.0	3.0	29.973	21.380	3.054	1.949	92,000	160
16hr	154.8	4.1	94.2	9.1	168.0	1.4	29.467	22.637	3.063	1.995	160,000	230
17hr	116.1	4.0	72.2	9.3	108.0	4.3	27.046	22.134	2.533	2.106	97,000	56
18hr	139.5	3.8	75.2	9.0	74.0	2.4	27.536	22.152	2.871	1.853	280,000	1,000
19hr	141.6	3.3	73.8	8.7	114.0	2.2	27.085	22.148	2.634	2.108	100,000	360
20hr	126.9	3.7	74.2	8.5	90.0	2.4	25.512	22.789	2.454	2.013	220,000	610
21hr	127.8	3.3	76.8	8.6	102.0	2.8	25.459	22.324	2.535	2.088	35,000	1,320
22hr	145.2	3.8	73.0	8.7	54.0	1.2	26.176	22.278	2.500	1.955	74,000	1,200
23hr	137.1	3.2	68.6	8.1	58.0	1.4	26.382	23.893	2.587	2.138	66,000	930
24hr	129.0	3.1	68.0	8.0	118.0	1.0	26.185	22.711	2.618	2.080	49,000	760
'04.12.8 1hr	140.7	3.6	72.0	8.5	54.0	1.8	27.805	22.533	2.750	2.071	76,000	2,200
2hr	119.0	2.0	66.4	9.0	90.0	1.2	29.144	23.144	3.043	2.171	300,000	660
3hr	130.5	3.6	67.8	8.9	82.0	1.2	27.895	22.865	2.683	2.252	29,000	640
4hr	94.2	3.3	66.2	9.3	77.0	1.6	26.739	23.101	3.020	2.174	28,000	1,700
5hr	106.1	2.4	65.3	8.5	72.0	2.0	23.760	23.550	2.396	2.188	44,000	2,000
6hr	98.0	2.6	67.6	9.0	82.4	1.6	23.847	23.056	2.127	2.183	140,000	1,400
7hr	136.2	2.6	78.4	8.8	138.0	1.2	22.206	22.869	1.912	2.183	110,000	1,000
8hr	113.4	3.3	76.8	8.0	140.0	1.4	29.411	22.208	2.713	2.169	120,000	1,300
9hr	135.6	2.6	81.6	8.2	144.0	2.2	33.006	23.342	3.255	2.317	160,000	1,100
최대	162.6	3.7	94.2	8.9	168.0	2.0	36.933	22.531	3.809	2.067	300,000	924
평균	130.2	5.3	74.9	9.7	107.1	4.3	28.439	23.893	2.846	2.317	131,667	2,200
최소	94.2	2.0	65.3	8.0	54.0	1.0	22.206	21.380	1.912	1.853	28,000	56

유입수 및 방류수의 시간대별 항목별 농도변화는 Fig. 14 및 15과 같다. 방류수가 농업용수나 하천유지용수로 이용될 경우에는 별 문제가 없을 것으로 판단된다.

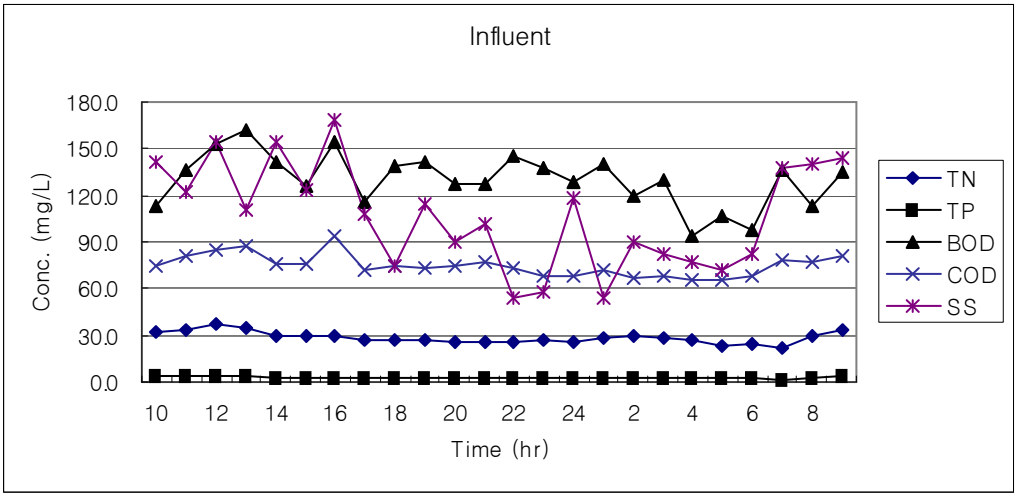


Fig. 14. Hourly variation of concentration in sewage influent

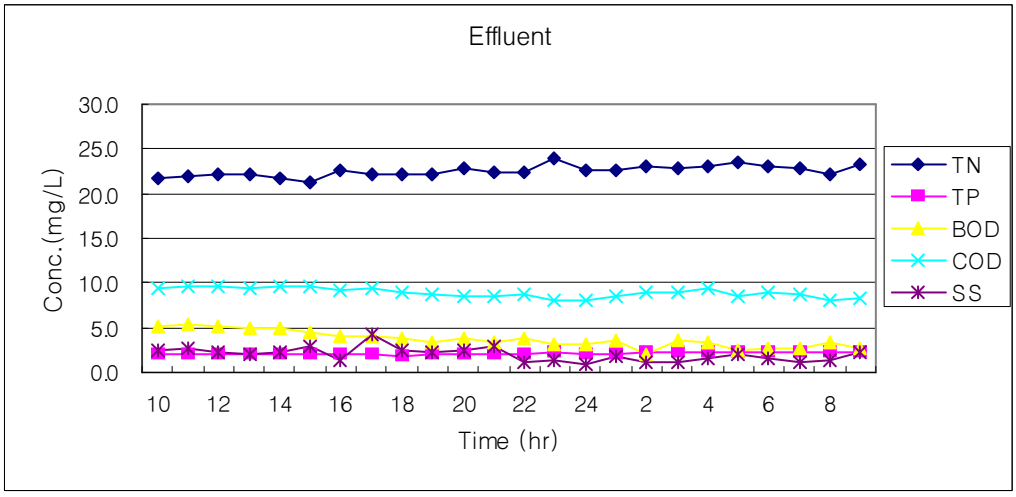


Fig. 15. Hourly variation of concentraion in sewage effluent

6. 조류조사

가. 일반적인 특징

- 세균류

세균류는 오폐수중의 유기물을 무기물로 분해, 안정화시키고 침강성이 양호한 플럭을 형성시키는 가장 중요한 역할을 하며, 조사결과 출현한 *Zoogloea*가 이에 속한다. 세균 중에서도 미세한 박테리아 집합체의 성능이 가장 탁월하여 오폐수 정화가 효과적으로 이루어지는데, *Zoogloea*가 중요한 플럭 형성세균의 하나로 점성을 가진 구름모양 또는 나뭇가지 모양의 집락을 만드는 세균의 총칭이다.

- 조류

조류는 광합성을 하는 생물로 몇몇 종의 경우 하수처리에서의 출현은 치명적인 피해를 줄 수 있다. 냄새를 일으키며, 점액질에 싸여 있는 경우는 동물성플랑크톤의 섭식을 방해하기 때문에 계속적인 대량번식의 우려와 침전에 어려움이 있다.

- 원생동물

세균에 비해 실제 처리장 관리과정에서 중요한 지표로 삼고 있는 것이 원생동물이다. 세균은 집합체를 이루고 있어 정량관찰이 어렵기 때문에 비교적 큰 원생동물을 관찰하여 그 상태를 판단하기 때문이다. 원생동물이 정상활동을 하고 있다는 것은 곧 세균과 원생동물의 먹이사슬관계로 볼 때 세균도 양호한 상태에 있다는 것을 의미하기 때문이다. 또한 세균, 그 이외의 작은 고형물을 섭취하여 현탁물을 감소시켜 수질을 향상시키고, 원생동물의 분비물에 의해 플럭화를 촉진시켜 침전효율을 높이기도 한다. 이러한 원생동물에는 조사결과 출현한 근족충류의 아메바, *Arcella*, *Euglypha*, 섬모충류의 *Vorticella*, *Epistylis*, *Paramecium* 등이 있다. 특히 섬모충류의 경우는 둘러싸인 미세한 섬모를 이용하여 활발한 활동을 하여 하수처

리공정의 효율을 표시하는 지표로서 중요하다. 가장 대표적인 종이 *Paramecium*이다.

- 윤충류

원생동물이 단세포동물이라면 윤충류는 다세포동물로 세균과 원생동물을 섭취하며 점액으로 덮인 분변성입자를 만들어 플럭형성에 기여한다. 일반적으로 윤충류의 개체수는 원생동물보다 적다고 알려져 있으며, 조사결과 원생동물보다 적은 수로 조사되었고, 출현한 윤충류로는 *Keratella*, *Philodina*, Lecane 등이 있다.

나. 출현 미생물

미생물은 세균, 조류(식물플랑크톤), 원생동물, 윤충류 등의 종류로 구분하여 조사하였으며, 출현한 미생물의 속은 4차에 걸쳐 조사한 자료를 구분하여 정리하였다.

다음은 1차와 2차 정성분석결과 총 출현한 속이다.

2004년 4월에 1차 조사한 결과 남조류 *Oscillatoria*와 원생동물 *Arcella*, *Vorticella*, *Epistylis* 등과 세균류 *Zoogloea* 등이 주로 우점 출현하였다. 조류는 주로 사상형의 남조류가 눈에 띠게 출현할 뿐 다른 조류종의 출현은 미비하였다(Table 21).

Table 21. Microbial and algal species appeared at 1st and 2nd investigation

분류군	출현속	분류군	출현속
Cyanophyceae	*Oscillatoria*	원생동물	*Arcella*
	Anabaena sp.		아메바
	Phormidium sp.		*Vorticella*
	Microcystis		*Epistylis*
Bacillariophyceae	*Cymbella*		*Paramecium*
	Synedra	선충류	선충류
Chlorophyceae	*Coccomyxa*	윤충류	*Lecane*
	Pandorina		*Keratella*
	Micractinium		*Philodina*
	Stigeoclonium		*Lepadella*
		세균류	*Zoogloea*
			Tokophrya
		흡적충류	

일반적으로 1차에서 출현한 *Epistylis*는 수질이 양호할 때부터 해체하는 상태까지 양호하게 나타나며, *Zoogloea*는 중요한 플록 형성세균의 하나로 나뭇가지 모양 또는 구름모양의 집락을 만든다.

Table 22. Microbial and algal species appeared at 3rd and 4th investigation

생물종	종별	3차	4차
원생동물	*Arcella sp.*	46	48
	Euglypha sp.	8	
	아메바		
	Vorticella sp.		5
	Epistylis sp.	-	1
	Paramecium sp.	-	
선충류	선충류	-	1
윤충류	*Lecane sp.*	-	
	Keratella sp.	-	
	Philodina sp.		4
	Lepadella sp.		1
세균류	*Zoogloea sp.*	-	2
기타	*Tokophrya sp.*	-	1
Cyanophyceae	*Oscillatoria sp.*	-	16
	O. limnetica	1	-
	Phormidium sp.		-
	P. autumnale		140
	Anabaena macrospora spirulina		-
Bacillariophyceae	*Cyclotella sp.*	28	10
	Navicula sp.	5	1
	Nitzschia sp.		1
	Gomphonema sp.		-
	Melosira granulata	4	1
	Synedra acus	1	1
	Fragilaria crotonensis		1

생물종	종별	3차	4차
Chlorophyceae	*Eudorina elegans*		3
	Pandorina morum	-	1
	Pediastrum duplex	1	1
	P. simplex	-	-
	Oocystis sp.	6	2
	Coelastrum sp.		-
	C. cambricum	-	
	Dictyosphaerium pulchellum	1	-
	Micractinium pusillum		1
	Selenastrum gracil	-	
	Staurastrum sp.	1	-
	Scenedesmus sp.		2
	S. quadricaud	22	3
	S. acuminatus		1
	Closterium sp.		-
	기타		-
Euglenophyceae	*Trachelomonas sp.*	-	1
	Phacus sp.		1
	Euglena sp.		1
Chrysophyceae	*Dinobryon sp.*		38

2004년 11월 2차 조사결과는 거의 대부분이 벽면에 부착하여 번식한 사상체 미생물인 남조류 *Oscillatoria*가 번식하고 있었다. 1차와 2차의 조사결과가 서로 다른 것은 여러 요인 중 계절적인 환경요인이 가장 크게 작용한 것으로 생각된다.

2005년 조사결과 총 45종이 출현하였다. 그 중 6월 조사결과 출현한 종은 38종으로 남조류 5종, 규조류 7종, 녹조류 14종, 유글레나류 3종, 황색편모조류 1종으로 조류 30종과 원생동물 3종, 선충류 1종, 윤충류 2종, 세균류 1종, 기타 1종이 출현하였다(Table 22).

2004~2005년까지 총 4회 실시한 조사결과 계절에 상관없이 꾸준히 출현한 속은 남조류 *Oscillatoria*, 규조류 *Synedra*, 원생동물 *Arcella*, *Epistylis*, 기타 *Tokophrya* 속, 선충류 등이다. 간혹 조류를 흡입한 원생동물도 관찰되었다.

2005년 3월 3차 조사결과 우점속은 원생동물 Arcella, Euglypha와 식물플랑크톤인 녹조류 *Scenedesmus*, 규조류 *Cyclotella* 등이 주를 이루었다. 그러나, 그 개체수는 극히 적은 양의 수로 조사되었다. *Arcella*, *Euglypha*는 질산화 진행중에 우점종으로 나타나며, 또한 저부하의 생물막에 출현하는 지표생물이다. 적은 개체수로 윤충류 *Lecane*의 출현과 *Tokophrya*의 출현도 있었다. *Tokophrya*는 작은 원생동물을 잡아먹는 생활을 하고, 양호기를 지나 해체하여 처리수에 SS가 많을 때까지 폭넓게 관찰되는 속이다.

2005년 6월 4차 조사하여 정성분석결과 광합성 규조류인 *Navicula*, *Gomphonema*, *Nitzschia* 등과 사상성 남조류인 *Oscillatoria*, *Phormidium* 등이 활발하게 번식하고 있었다. 규조류와 남조류의 경우 부유성의 조류와 부착성의 조류가 동시에 번식하고 있었으며, 또한, 냄새 종의 대부분이 벽면에 부착되어 서식하고 있음을 알 수 있었다.

남조류속의 *Phormidium autumnale*, *Oscillatoria limnetica* 등은 곰팡이 냄새물질인 Geosmin과 2-MIB(2-Methylisoborneol)을 생성하고, *Anabaena macrospora*는 Geosmin을 생성한다. *Anabaena*는 5,300cells/ml, 200units/ml에서 냄새를 유발하고, *Oscillatoria*는 53,000cells/ml, 3,000units/ml에서 냄새를 유발한다고 알려져 있다. 또한, 사상성 조류는 플럭 형성균에 비해 환경에 대한 적응범위가 넓고, 원생동물 등의 포식자에게 먹히지 않기 때문에 번식속도가 빠르다.

본 연구에서는 조류 분석시료 채취 시 벽면에 부착된 조류를 따로 채집하지 않고 시료수를 그대로 채집하였기 때문에 분석결과 남조류의 개체수가 적게 나타났지만, 곰팡이 냄새의 원인은 사상성 부착조류라고 생각된다.

제2절 중수 목표수질기준 설정

중수는 목욕용수, 세탁용수, 화장실 세척용수 및 조경용수 등으로 이용하는 것을 목표로 하고, 먹는물 수질기준을 고려하여 Table 23~24와 같이 본 연구의 중수 목표수질기준을 설정하였다.

각각 연속처리공정 처리수 수질확인용 목표수질기준과 목욕용수나 세탁용수의 목표수질기준을 정하여 최고급 중수를 생산하는데 목표를 두었다. 사람이 직접 피부에 접촉하는데 사용되는 목욕용수나 세탁용수는 피상적인 불쾌감이 크게 작용한 만큼 먹는물 수질기준과 비교할 때 크게 손색이 없어야 할 것으로 사료되어, 목표수질기준을 먹는물 수질기준과 비슷하게 설정하였다.

중수를 목욕용수나 세탁용수로 사용하기 위해서는 위생적으로 먹는물과 비슷한 수질이 확보되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 중수 수질기준을 총 14개 항목에 대하여 설정하였다. 이 중 시설관련 항목은 pH, 경도, 잔류염소, 염소이온, 음이온계면활성제(ABS), 증발잔류물, 철, 망간 등 8개 항목이고, 감각적 항목은 색도, 탁도, 냄새 등 3개 항목이며, 위생적 항목은 $KMnO_4$소모량, 일반세균, 총대장균군 등 3개 항목이다.

목욕용수의 수질기준은 먹는물 수질기준에 준하여 설정하였다. 중수가 인체의 피부에 직접 접촉되는 점을 고려하여 수질기준을 강화하였다. 생활용수 중에서 세면, 목욕, 세탁, 화장실 용수의 점유율이 60~80%이기 때문에 목욕용수 등을 중수로서 사용할 경우 상수도 소비량이 줄어듦으로써 그 만큼 수돗물이 절약된다.

Table 23. Target standards estimated for the reuse water

기준항목	탁도(NTU)	색도(deg.)	DOC(mg/L)	T-P(mg/L)	냄새
목표 수질기준	0.5	5	1.0	0.1	No bad smell
먹는물수질기준 (수돗물)	1.0 (0.5)	5	1.0	0.1	No bad smell
방류수 측정값	0.84	15.8	4.7	1.30	a little

※ DOC는 미국의 정수처리 기준이고, T-P는 공업용수 2급수 수질기준임.

그러나 시민이 심미적으로 느끼는 부분을 고려하여 목욕용수나 세탁용수보다 조경용수나 살수용수로 중수수질기준을 맞출 때는 2005년 이후 하수처리장에 도입되는 인·질소 고도처리공정과 추가로 응집과 소독공정의 도입만으로도 이용이 가능할 것으로 판단된다(Table 24).

Table 24. Target standards estimated for the purpose of usage of reuse water

구 분		목욕용수	세탁용수	구 분		목욕용수	세탁용수
시설기능적	pH	5.8~8.6	5.8~8.6	감각적	색도(도)	5 이하	5 이하
	경도(mg/L)	300 이하	300 이하		탁도(NTU)	0.5 이하	2 이하
	잔류염소(mg/L)	0.2 이상	0.2 이상		냄새	가온해서 냄새없을것	불쾌한 냄새없을것
	염소이온(mg/L)	200 이하	200 이하	위생적	$KMnO_4$소모량(mg/L)	10 이하	20 이하
	ABS(mg/L)	0.5 이하	0.5 이하		일반세균(개/ml)	100 이하	100 이하
	증발잔류물(mg/L)	500 이하	500 이하		대장균군(개/ml)	미검출	미검출
	철(mg/L)	0.3 이하	0.3 이하				
	망간(mg/L)	0.3 이하	0.3 이하				

방류수를 이용하기 위해서는 탁도유발물질, T-P 및 잔존하는 유기물을 제거하기 위한 응집공정을 도입하고, 색도물질 및 냄새물질을 제거하기 위한 활성탄공정의 도입하며, 마지막으로 적절한 막분리 공정을 도입하여 본 연구에서 설정한 중수 목표수질에 부합되고 이용 목적에 상응하는 수질을 확보하여야 한다고 사료된다.

제3절 응집공정

1. 응집제의 투입량에 따른 처리효율 비교

본 연구에서 사용된 응집제는 Alum, $FeCl_3$와 PAC로서 Alum은 Al_2O_3 함량이 8%이고, $FeCl_3$는 Al_2O_3 함량이 14%, PAC는 Al_2O_3 함량이 10%인 액상 응집제이다. 세 종류 모두 상수의 정수처리용으로 사용되는 등급의 응집제를 사용하였고, 실험을 위해 1%의 용액을 제조하여 Jar-Test에 사용하였다.

주요 비교항목으로는 탁도, 색도(여과 전・후), DOC(용해성유기탄소), T-P(여과 전・후), T-N, pH, 처리효율 등이고, 응집제의 농도범위는 0～350㎎/L로 하였다.

가. 탁도

탁도의 경우, Alum을 사용했을 때는 투입량이 100㎎/L일 때 처리효율이 가장 좋았고, 응집제의 량이 증가할수록 탁도 처리효율이 감소하는 현상을 보였는데 이는 탁도성 콜로이드 물질의 하전중화가 이루어진 후 응집제에 의해 (+) 전하로 바뀌면서 응집효율이 감소하기 때문이다. Alum의 응집범위가 80～120㎎/L로서 매우 좁은 반면, PAC를 사용하였을 때는 80㎎/L에서부터 220㎎/L에 이르는 넓은 응집제 투입량 범위에서 처리효율이 좋은 것으로 나타났다(Fig. 16). 방류수 원수의 탁도가 1 NTU 부근으로 매우 낮아서 응집제로 $FeCl_3$를 사용했을 경우는 응집제 투입량 160㎎/L일 때 탁도가 0.25NTU로서 가장 낮았지만 전반적으로 높게 나와서 원수의 탁도가 높은 경우에만 효과가 있는 것으로 사료된다.

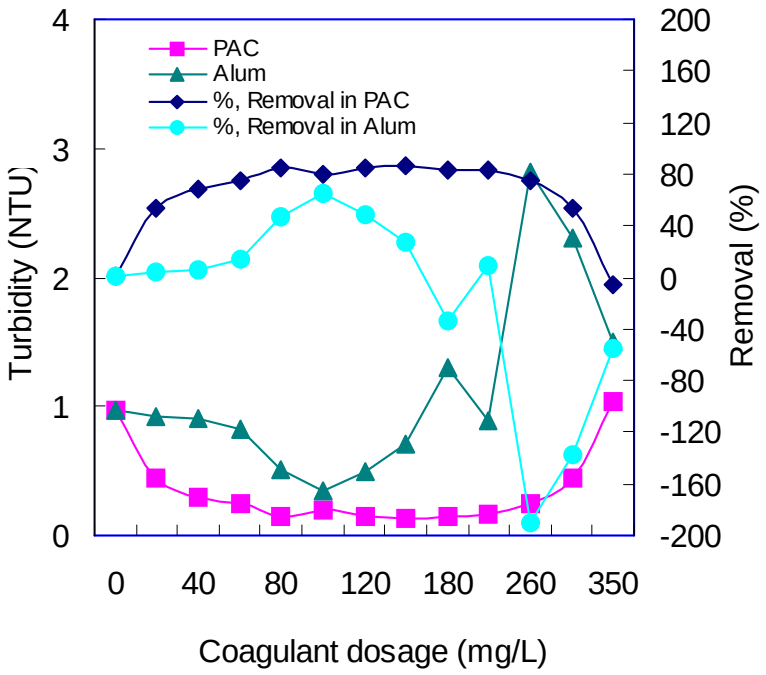


Fig. 16. Effect of coagulant on the removal of turbidity

나. 색도

용존성 색도는 방류수 원수를 0.45㎛ 멤브레인을 통과시킨 후 색도를 측정한 것으로서, 총색도에 대한 용존성색도의 비율이 91%로 조사되어 대부분의 색도물질이 용존성으로 존재함을 보여 주었다. Alum을 사용했을 때 투입량이 300㎎/L에 이르기까지 처리효율이 계속 증가하다가 350㎎/L 지점에서 역전현상을 보였다. 이는 색도물질이 탁도물질보다 훨씬 작고 많은 분자수가 존재하여 대응하는 응집제의 분자수가 많기 때문에 비례적으로 증가하는 것으로 보이며, 응집제의 분자가 색도물질과의 반응에 지속적으로 관여하여 계속 소비된 것으로 판단된다. PAC를 사용한 경우는 350㎎/L에서도 계속 색도가 감소하는 것으로 나타났다. Alum을 사용했을 때 응집제 투입량 100㎎/L에서 색도물질의 처리효율은 35%이고, PAC를 사용했을 때 응집제 투입량 80㎎/L에서 색도물질의 처리효율은 39%이었다. 그리고 Alum의

투입량이 300㎎/L에서 색도물질의 처리효율은 60%이고, PAC의 투입량 350㎎/L에서 색도물질의 처리효율은 66%이었다(Fig. 17~18). 그러나 $FeCl_3$를 사용했을 경우는 응집제 자체가 색도물질을 함유하고 있어서 색도 제거에는 거의 효과가 없는 것으로 나타나 저탁도의 하수처리장 방류수 처리에는 사용을 지양해야 하는 것으로 나타났다.

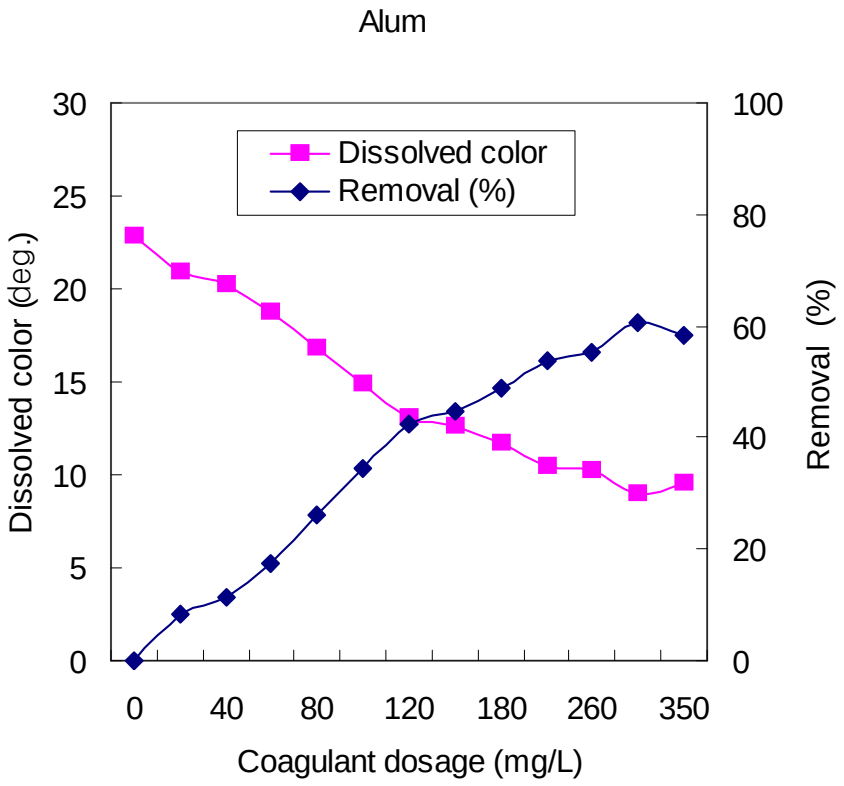


Fig. 17. Effect of Alum on the removal of dissolved color

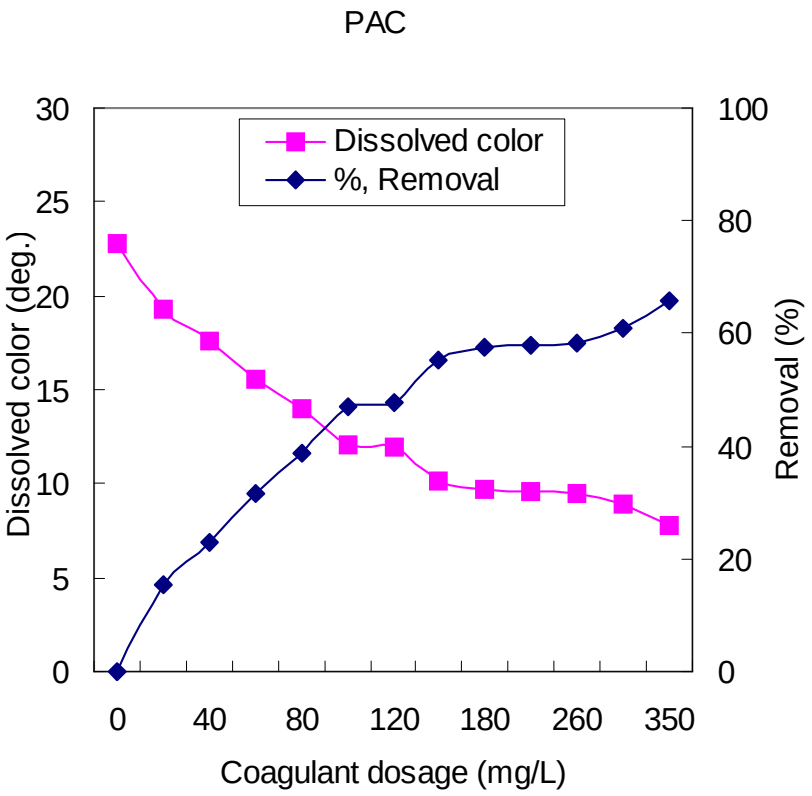


Fig. 18. Effect of PAC on the removal of dissolved color

다. *pH*

방류수 원수의 pH가 7.0에서 응집제를 투입하게 되면 산성이 강한 Alum의 경우 PAC보다 pH의 감소가 커진 것을 확인할 수 있었다. Alum의 경우 응집제 100㎎/L 투입될 때마다 pH가 0.35 정도 감소하였고, PAC의 경우는 0.2 정도 감소하였다. 이는 원액의 pH가 Alum은 3.1인 반면, PAC는 4.2로서 pH 저하에 적게 영향을 미친 것으로 조사되었다. $FeCl_3$의 경우는 원액의 pH가 1.8이하로 매우 낮았고, 응집제가 350㎎/L 투입되었을 때는 pH 4.2까지 낮아졌다(Fig. 19). 따라서 $FeCl_3$를 응집제로 사용할 경우는 pH를 조절하기 위해 응집보조제로서 NaOH나 CaO 등을 투입하고

응집효율을 향상시켜야 할 것으로 보인다.

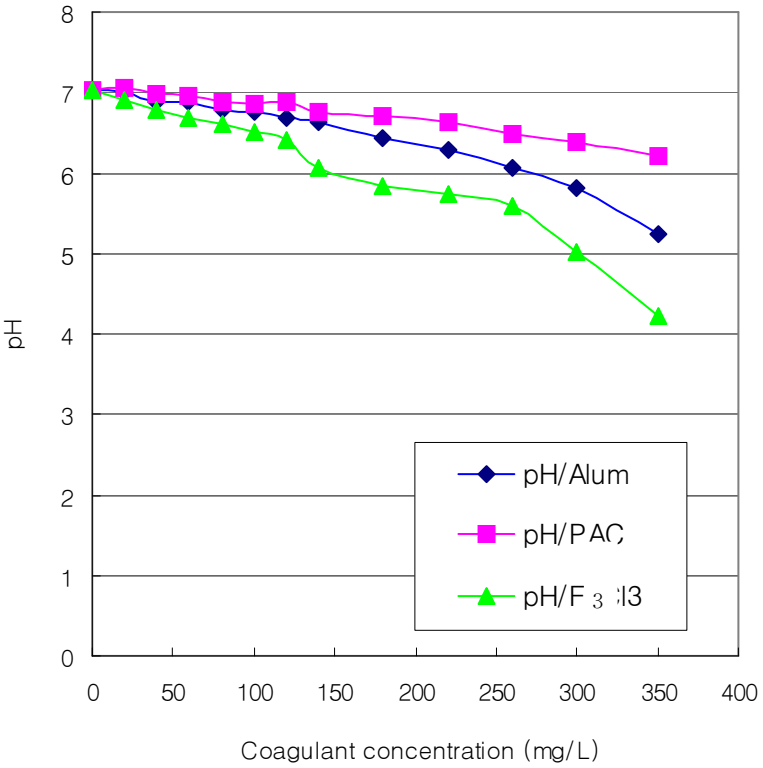


Fig. 19. Variation of pH according to coagulant dosage

라. 용존성 총유기탄소

응집 처리한 경우의 DOC(용존성 총유기탄소) 처리효율을 조사한 결과, 색도와 변화 경향이 매우 흡사하여 응집제의 투입량이 증가함에 따라 DOC의 농도가 계속 감소하는 것을 확인하였다. 이는 DOC 유발물질의 대부분이 색도물질과 관련이 있다는 것을 암시적으로 말해주고 있다. Alum을 사용했을 때 응집제 투입량 100㎎/L

에서 DOC물질의 처리효율은 20%이었고, PAC을 사용했을 때 응집제 투입량 80㎎/L에서 DOC물질의 처리효율은 23%이었다. 그리고 Alum의 투입량이 350㎎/L에서 DOC물질의 처리효율은 38%이었고, PAC의 투입량 350㎎/L에서 DOC물질의 처리효율은 44%이었다(Fig. 20). 색도물질보다 DOC 물질의 제거효율이 응집공정에서는 낮게 조사되었는데, 이는 DOC 물질 중에서 응집에 의해 제거되지 않는 물질이 상당량 존재하고 있다는 것을 제시해 준다. 따라서 응집에 의해 제거되지 않는 유기물의 제거를 위한 활성탄 흡착공정은 방류수를 중수로 이용하기 위해서는 필수적이라고 판단할 수 있다.

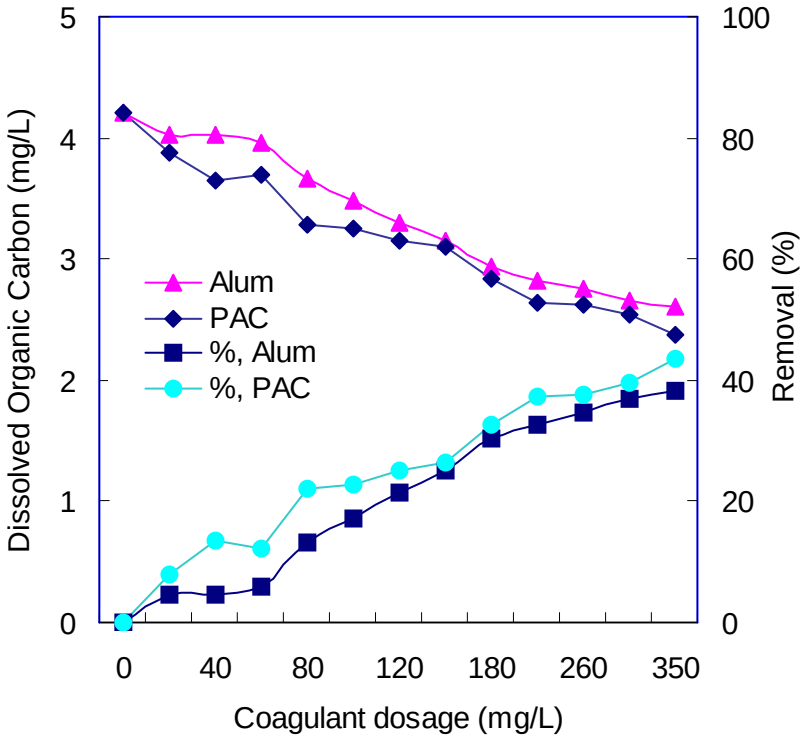


Fig. 20. Effect of coagulants on the removal of dissolved organic carbon

마. 영양염류

T-P의 경우, 용존성인이 T-P 중에 차지하는 비율이 90% 이상인 것으로 조사되었다. Alum의 투입량이 100㎎/L일 때 T-P의 처리효율은 90% 이상이었고, PAC의 투입량이 100㎎/L에서 처리효율은 92%에 이른 것으로 나타났다. 그 이상의 응집제 투입량 범위에서는 두 가지의 응집제 모두 95% 이상을 계속 유지하는 것으로 나타났다(Fig. 21). T-N의 경우는 응집공정에 의해서는 거의 제거가 되지 않은 것으로 조사되어 T-N 제거를 위한 고도처리공정의 도입이 필요하고, 광주광역시의 현안 사업으로 처리공정에 대한 검토가 이루어지고 있으므로 중수 연구결과를 동시에 반영할 경우 시너지 효과가 클것으로 판단된다.

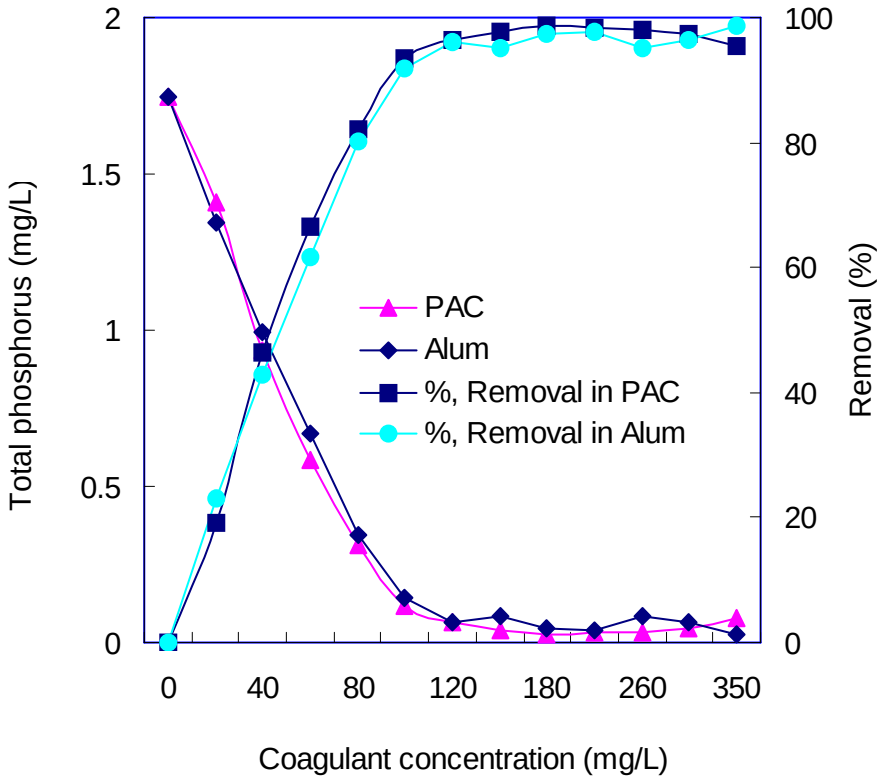
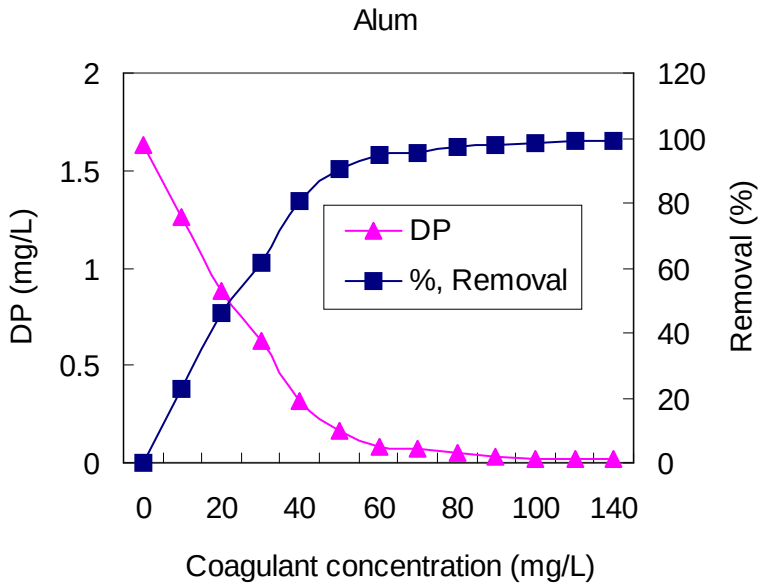
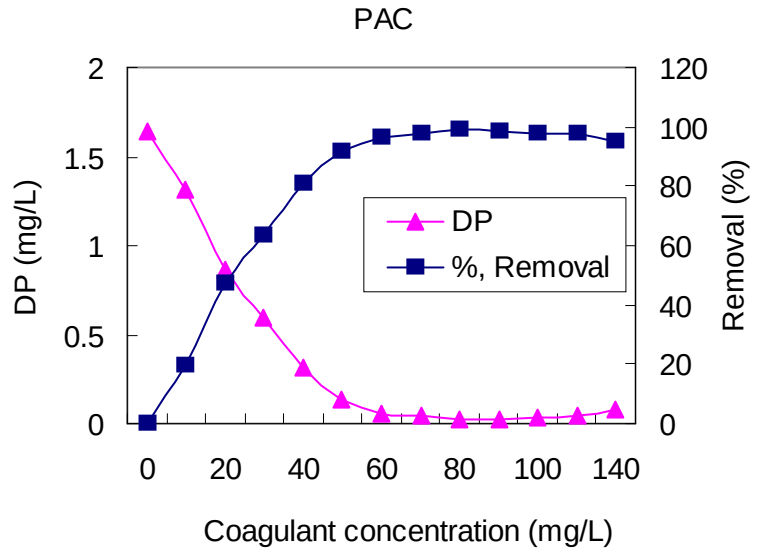


Fig. 21. Effect of coagulants on the removal of total phosphorus

Fig. 22는 용존성인의 응집제의 종류별, 응집제 투입량에 따른 처리효율을 비교 조사한 것으로서, T-P의 경우와 유사한 경향을 보여주고 있다.



(a) Alum



(b) PAC

Fig. 22. Effect of coagulants on the removal of dissolved phosphorus

2. *pH*의 변화에 따른 처리효율 비교

하수처리장 방류수의 pH는 주로 6.0~8.0 범위에 있고, 일정한 응집제 투입량에서 pH의 영향을 고찰하기 위해, Alum의 투입량은 100㎎/L, PAC의 투입량은 80㎎/L로 선정하였으며, pH 3.0~12.0 범위에서의 탁도, 색도, T-P 등의 처리효율을 조사하였다. 응집처리시 초기 pH와 최종 pH는 약간의 변화가 있는데, 최종 pH가 원하는 pH 범위에 맞도록 0.1N NaOH 용액과 0.1N HCl 용액을 이용하여 조절하였다.

탁도의 경우는 pH가 6.0~10.0 범위 내에서 최적처리가 되고, 특히 PAC를 응집제로 사용한 경우에 Alum을 사용한 경우보다 처리효율이 약간 좋은 것으로 나타났다(Fig. 23). 그러나 중수에 이용할 경우는 경제성을 고려하여야 하기 때문에 단가가 낮은 Alum을 사용하는게 더욱 타당하다고 판단된다.

용존성색도는 Alum을 사용한 경우 pH 4.0~7.0 범위에서 적정 처리되었고, 그 이외의 범위에서는 잔여 색도가 매우 높은 것으로 나타났으며, PAC의 최적 pH 범위는 5.0~7.0인 것으로 조사되었다(Fig. 24).

용존성인의 경우 최적 응집제 투입량 조건은 Alum의 경우 pH 5.0~8.0, PAC의 경우 pH 4.0~8.0로 나타났고, 이 때 용존성인을 0.1㎎/L 이하로 처리가 가능한 것으로 조사되었다(Fig. 25).

UV-254를 측정한 결과, 용존성색도의 경우와 유사한 경향을 보여 주었고, 두 종류의 응집제에 대한 최적 응집 pH 범위는 5.0~6.0 정도인 것으로 조사되었다(Fig. 26).

종합적으로 Alum과 PAC의 최적 응집 pH 범위는 5.0~7.0인 것으로 조사되었다. 이는 상수처리시 적정 pH 영역인 6.0~6.5의 범위와 유사하게 나타났다.

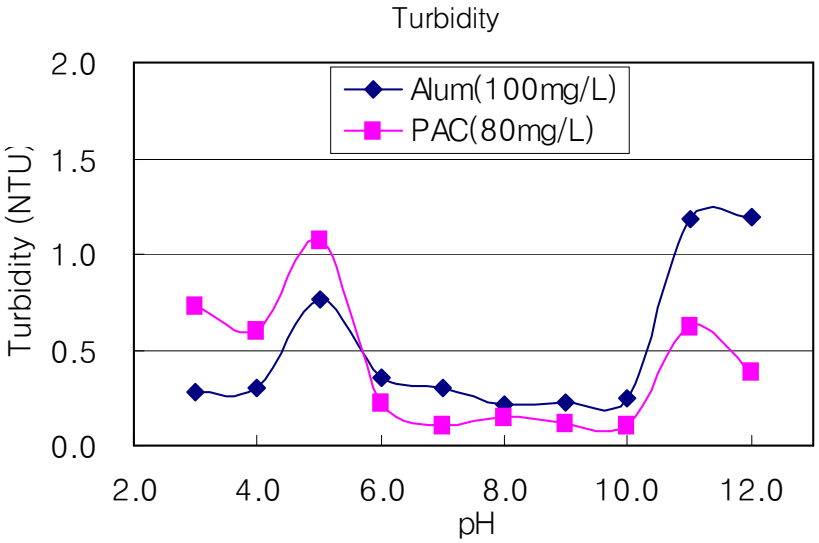


Fig. 23. Effect of pH on the removal of turbidity

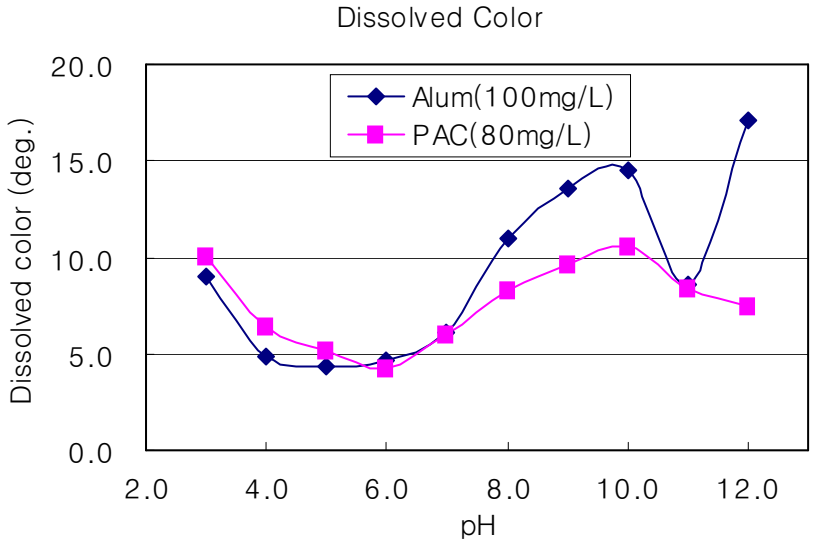


Fig. 24. Effect of pH on the removal of dissolved color

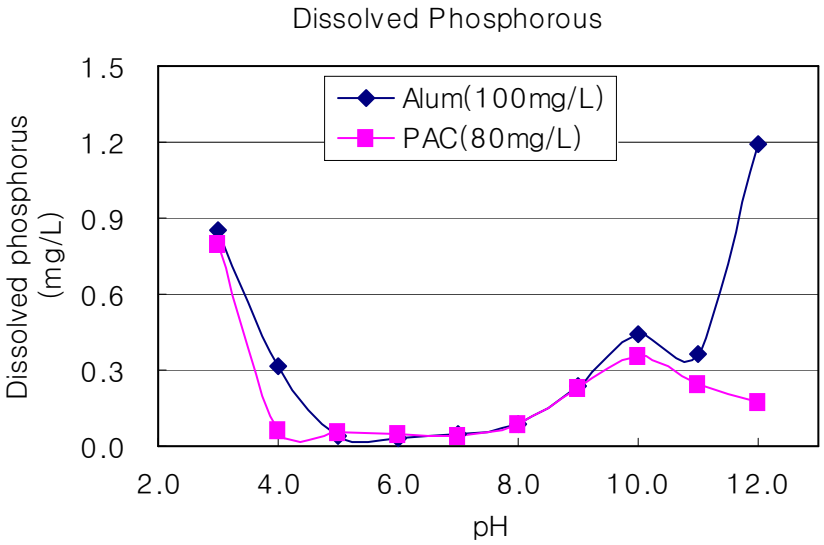


Fig. 25. Effect of pH on the removal of dissolved phosphorus

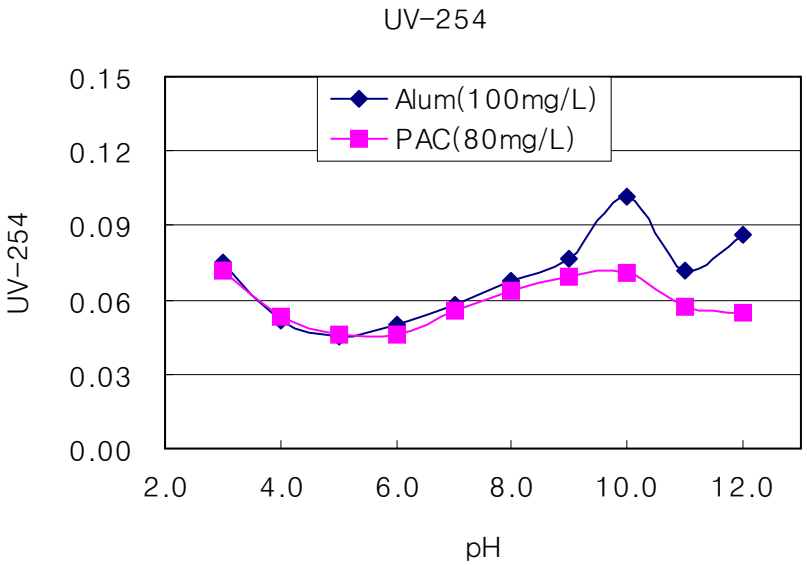


Fig. 26. Effect of pH on the removal of UV-254

이상의 결과로부터 하수처리장 방류수의 pH 범위가 6.5~7.5 범위인 것은 고려할 때 적정한 응집제의 투입량은 Alum의 경우 100㎎/L, PAC의 경우 80㎎/L 정도로서, 중수로 활용하기 위해서는 활성탄 등의 추가공정을 도입하여 잔여 색도물질을 제거하여야 할 것으로 본다.

제4절 흡착공정

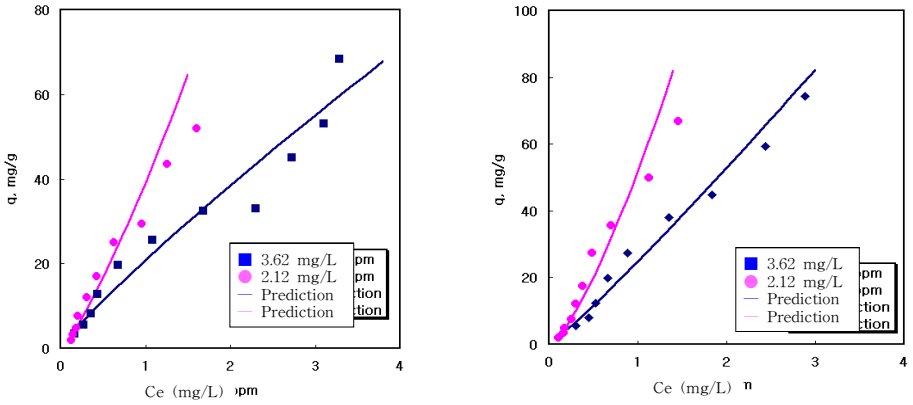
1. 흡착평형

흡착평형실험 결과, 같은 성분들을 가지는 수용액이라도 용액의 농도에 따라 흡착등온선이 일치하지 않음을 보여준다. 이는 흡착제 상에서 흡착물질들 간의 경쟁흡착이 강하게 일어나는 것을 의미한다. Fig. 27에서 두 그림을 비교하면 동일 농도에서 2가지의 분말활성탄을 사용하였을 때의 흡착등온선이 서로 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 농도가 동일하고 흡착제의 물리적인 성질이 비슷하더라도 흡착제의 원료물질이나 제조과정이 다르고, 이로 인한 흡착제의 화학적 성질이 상이하여 이것이 흡착제와 제거물질과의 흡착친화도에 영향을 준 것으로 보인다.

흡착평형 실험결과, 두 가지의 흡착제 중 석탄계 분말활성탄(PWWL)의 흡착성능이 야자계 분말활성탄(PWPL)의 흡착성능보다 더 우수한 것으로 조사되었다. 이는 비표면적이나 세공용적 등의 물리적 특성이 우수한 야자계 활성탄이 미세공을 다량 함유하고 있지만, 실질적으로 제거해야할 대상물질의 크기가 석탄계 활성탄의 미세공과 연관성이 크기 때문인 것으로 판단된다.

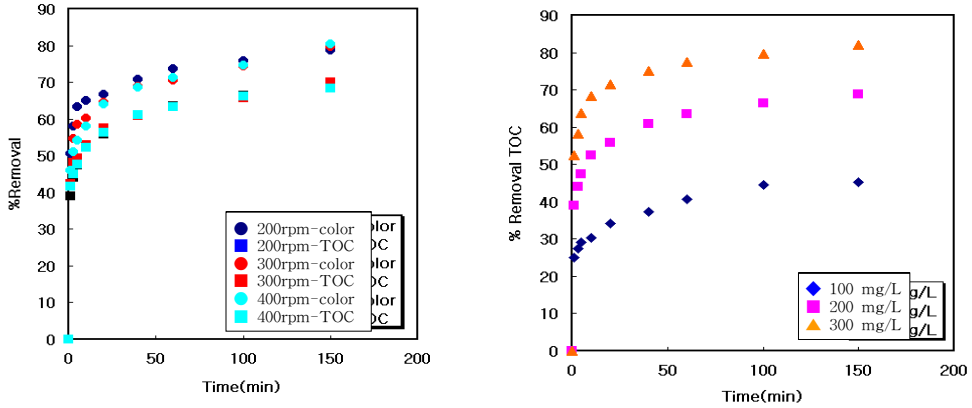
모든 유사성분들이 동일한 Freundlich exponent n 을 갖는다고 가정을 한 표적화 방법에 의해 이론식으로부터 구한 예측치와 실제 실험치와의 평형실험 값을 비교한 결과, 대상물질인 DOC(용존성유기탄소)의 흡착량에 있어서 다소 오차가 있음을 보여주고 있다. 이는 유사성분을 그룹으로 분류하여 모사함에 따른 전반적인 오차를 내포하고 있기 때문으로 제거대상 물질 중에 친수성 물질, 소수성 물질, 반친수성 물질 등의 세부적인 그룹으로 분류하고, 분자량의 크기별로 세분화하여 물질의

흡착평형실험을 실행할 경우 더욱 이론식을 잘 모사할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) PWPL(coconut base)　　(b) PWWL(coal base)

Fig. 27. Adsorption isotherm of DOC for two adsorbents



(a) PAC dosage : 200㎎/L　　(b) Mixing speed : 200RPM

Fig. 28. Adsorption isotherm of TOC and Color for two adsorbents

두 종류의 분말활성탄에 대하여 교반속도를 각각 200, 300, 400rpm으로 하고 활성탄 투여량을 100 ㎎/L, 200 ㎎/L, 300 ㎎/L으로 변화시켜 가면서 실험하였고, 실험결과 교반속도가 300rpm 이상인 경우에는 흡착량에 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다(Fig. 28). 또한 활성탄 투여량은 100~300㎎/L 중에서 300㎎/L일 때가 처리효율이 가장 좋았으나 응집과 막분리를 함께 실시하는 복합공정임을 감안할 때 색도 및 TOC 제거율을 90%정도로 맞출 수 있는 적정한 활성탄 양을 선정하여 경제성측면을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

2. 분자량 분포

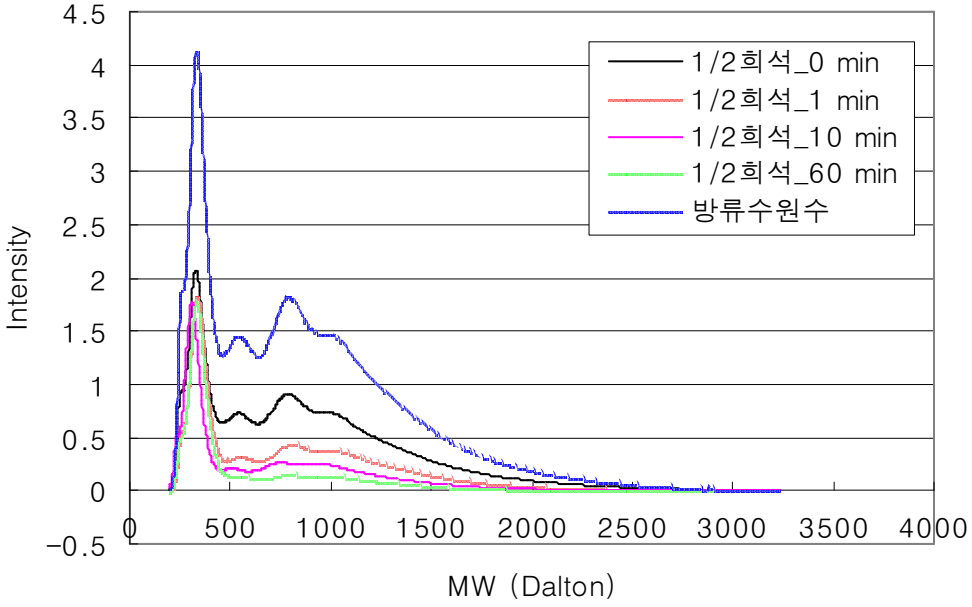
방류수 원수를 활성탄 처리했을때, 전 후에 제거된 물질의 분자량을 파악하기 위하여 HPLC를 이용하여 분자량 분포를 조사하였고, 산출된 산술평균, 가중평균, 그리고 분산도 등은 Table 25와 같다.

Table 25. Variation of RMW and polydispersivity by PAC treatment

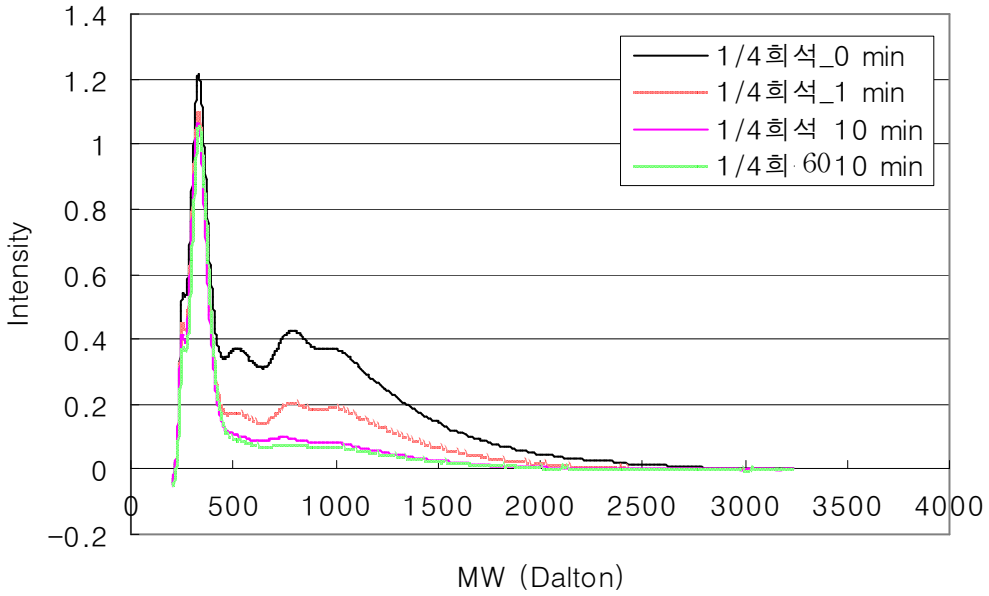
활성탄 투입 후 경과시간(min)	1/2 희석시				1/4 희석시			
	0	1	10	60	0	1	10	60
산술평균분자량 (Dalton)	621	563	517	440	604	521	434	429
가중평균분자량 (Dalton)	875	805	750	613	860	754	598	589
분산도	1.41	1.43	1.45	1.39	1.42	1.45	1.38	1.37

1/2로 희석한 원수 4L를 회분식 반응조에 넣고 활성탄(PWWL, 석탄계)을 1g 투입한 후 경과 시간에 따른 분자량분포(RMW, Relative Molecular Weight)의 변화를 조사하였다. 방류수 원수의 가중평균 분자량이 875 Dalton에서 활성탄에 의해 처리되면서 613 Dalton으로 작아지는 경향을 볼 수 있었는데, 이는 활성탄에 의해 500~2,500 Dalton 영역에 있는 분자들이 흡착으로 제거된 것으로 보이며, 분산도

가 1.4 정도로 나타난 것은 분자량이 넓게 분포하고 있음을 보여준다. 반면에 분자량이 500 Dalton이하의 영역에 있는 물질에 대해서는 활성탄에 의해 제거되는 양이 적음을 알 수 있다. 1/4 희석한 시료의 경우는 가중평균 분자량이 860 Dalton에서 시간의 경과에 따라 754, 598, 589 Dalton으로 분자량이 작아지는 경향을 보이며 시간이 흘러도 580 Dalton 부근에서 변화폭이 줄어드는 것을 볼 수 있었다 (Table 25, Fig. 29).



(a) Diluted on an half



(b) Diluted on a quarter

Fig. 29. RMW distribution of TOC after PAC treatment according to the dilution amount of sewage effluent

제5절 막분리공정

1. 막 세척

막 공정에서 정밀여과 막의 성능을 조사하기 위해서는 먼저, 초순수를 이용하여 플럭스변화의 유무를 알아보아야 하며, 플러스변화는 시간 변화에 따른 유량의 변화를 측정하여 알아볼 수도 있지만 본 연구에서는 압력 변화를 이용하여 막분리 공정 전 과정에 거쳐 실시간으로 추적하여 막투과 과정을 알아보고 막의 오염과 교체시기 등을 알아보았다(Fig. 30). 만약 플럭스변화가 생겼을 때는 제작한 막 모듈을 실험 전에 항상 전처리를 거쳐야 한다.

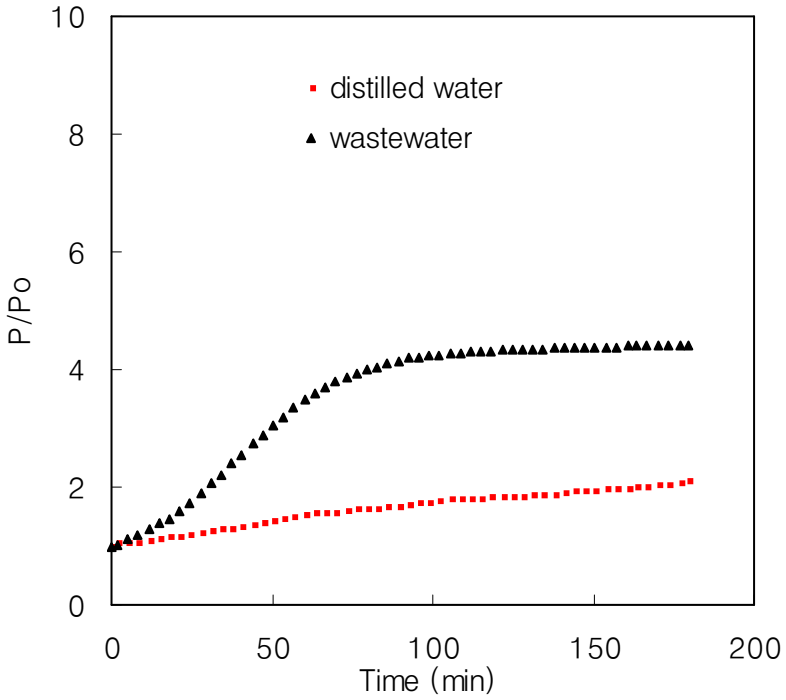


Fig. 30. Variation of relative pressure in the initially used membrane module

플럭스변화는 일반적으로 콜로이드성 물질과 친수성 유기물의 영향을 가장 많이 받으므로 0.4% NaOCl나 4% NaOH 용액으로 2시간 동안 2회 이상 세척하여 제거할 수 있었으며, 그 외 무기성분은 1% HCl 용액으로 2-5회 정도, 2% citric acid로 2회 이상 세척을 하고 나서 다시 초순수를 이용하여 플럭스변화가 없는 것을 확인하고 실제 실험에 사용하였다(Fig. 31). 막 모듈을 재사용할 때도 같은 방법을 이용하여 세척을 실시한 후에 실험하였다.

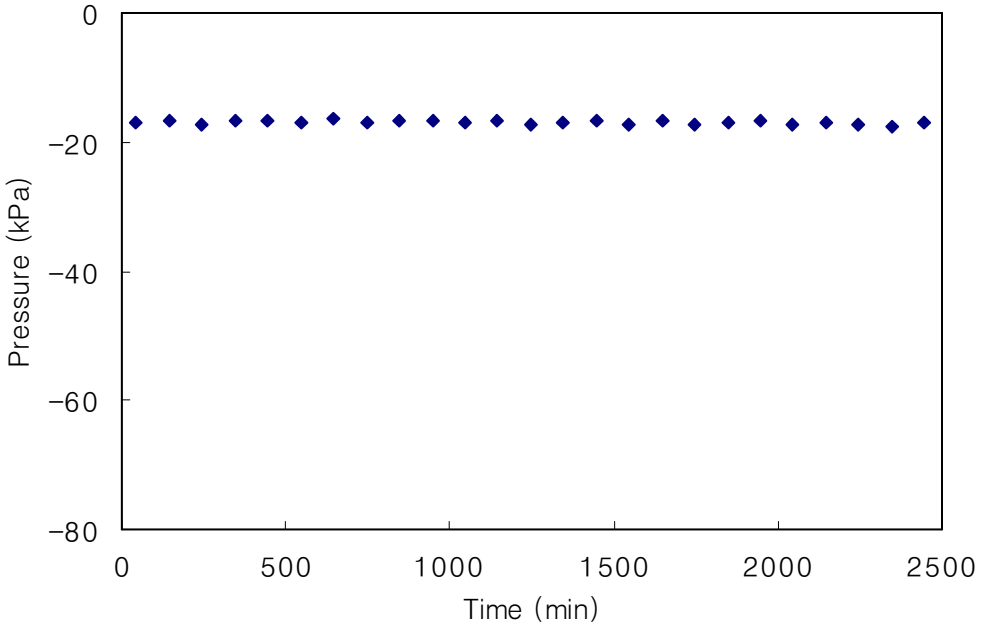


Fig. 31. Variation of relative pressure after cleaning by chemicals

2. 막 오염 제어

방류수의 이용 공정에 막분리 공정을 적용시 전체 시스템의 성패를 좌우하는 가장 중요한 요소 중 하나가 막 오염에 따른 운전조건 선정, 막 교체시기 및 화학약품을 이용한 세척시기 등이다. 따라서 막 오염을 일으키는 원인을 파악하고 오염을 방지할 수 있는 방법을 강구하는 것은 막의 수명을 증가시켜 생산량을 증가시키고 운영비용을 줄여 경제적인 효과를 거둘 수 있다.

막 오염은 막의 공극(pore)과 표면에 macromolecules, colloid 입자 등의 침적으로 인한 가역·비가역 현상을 말한다. 이로 인하여 막의 성질이 물리·화학적으로 변화되어 물의 흐름에 영향을 주고, 막 여과에 따른 투과플럭스를 감소시켜 생산량의 차질을 가져오며, 운전하는 동안 발생된 플럭스 손실은 쉽게 회복되지 않는다. 이러한 플럭스 손실은 농도와 점도의 증가, 유속과 압력 등의 운전조건의 변화에

따라 영향을 받는다. 또한 막 투과플럭스의 감소는 막의 특성 즉, 재질, 공경 및 원수의 물리화학적 특성에 따라 차이가 난다.

가. *pH*변화에 따른 막오염 조사

막 오염은 대부분의 막 공정에서 흔히 일어나는 현상이고, 일반적으로 세공 막힘에 의한 물리적 현상은 크게 4가지로 구분하여 설명할 수 있다. 첫째는 흡착으로 인하여 모든 세공이 작아지며, 작아진 세공에서 세공막힘(plugging) 현상이 일어난다. 둘째는 미세한 입자가 세공을 막는 경우이며 이는 흡착과 다른 세공막힘 현상이다. 셋째는 막 표면 근처에 흡착 층이 형성되고, 이 층에서 화학적인 결합이 가역·비가역적인 반응을 일으켜서 막 표면에 침적되어 궁극적으로 cake층이 형성되어 시간이 흐를수록 실제의 세공경은 자연히 적어지게 되는 현상이다. 넷째는 세공경보다 큰 입자들이 비교적 큰 세공을 막고 작은 세공은 그대로 남게 되어 전체적으로 세공의 분포를 줄어들게 하는 경우로서, 이러한 현상들은 막의 경제성을 떨어뜨려 생산량에 차질을 가져오게 된다.

막 여과공정에서 막 오염을 줄이는 방법은 유입수와 막 표면에서 형성되는 여러 현상들을 제어하여 플럭스의 감소를 방지하는 것이다. 일반적으로 유입수의 전처리, 막의 세척, 막 표면의 특성개선, 물질전달 향상에 의한 방식 등으로 크게 분류할 수 있다. 유입원수의 전처리 방법은 염소, 응집, 활성탄 처리 등 다양한 방법이 사용되고 있다. 유기물에 의한 오염은 적어도 두 가지의 다른 상호반응에 의해 야기되는데, 막에서의 흡착과 케이크 또는 막 표면에서 gel층의 생성이다. 이러한 상호반응은 운전하는 동안에 발생될 수 있는 비가역적인 오염에 상당히 기여할 수 있다. 따라서 전처리의 목적은 비가역적인 오염의 양을 감소시키는 것이며, 이러한 전처리를 통하여 처리수의 투과 유출을 증가시키게 된다.

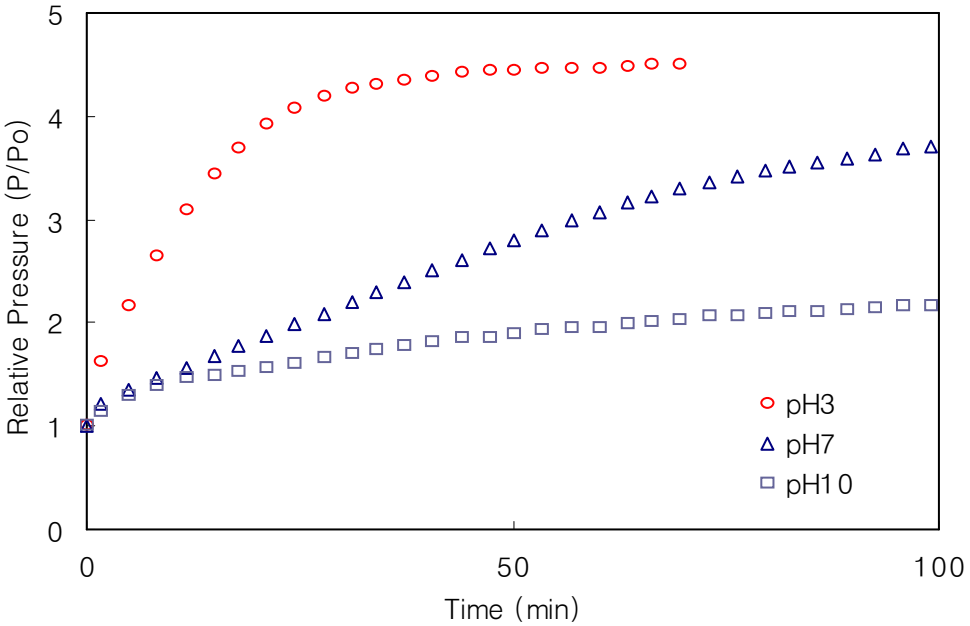


Fig. 32. Variation of relative pressure vs. pH on MF membrane process

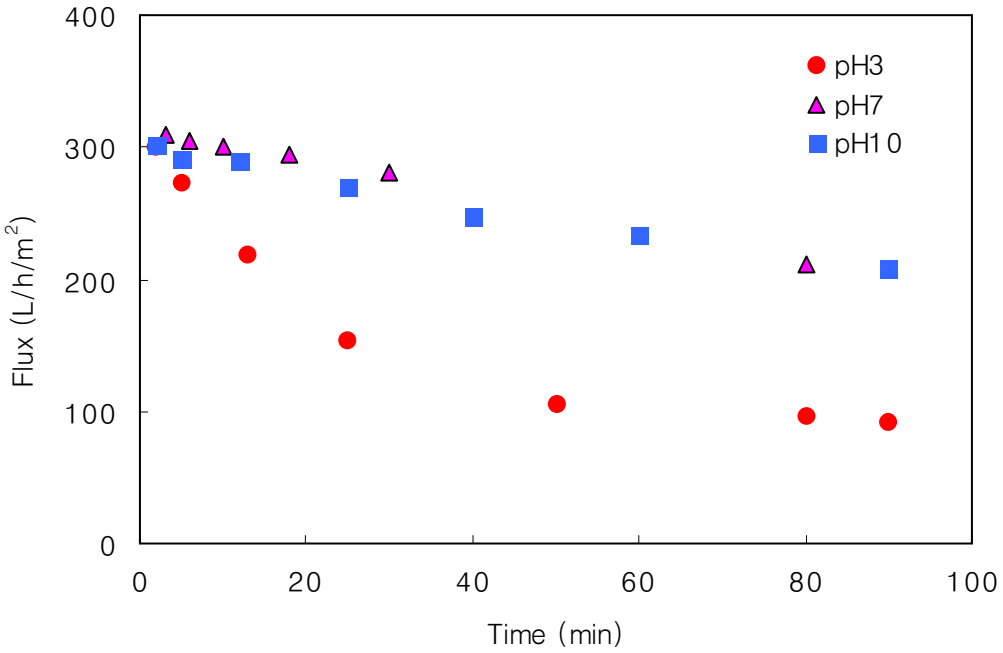


Fig. 33. Variation of flux vs. pH on MF membrane process

하수처리장 방류수가 응집처리된 2차 처리수를 정밀여과막을 이용하여 시간에 따른 압력과 투과 유속(Flux)의 변화를 조사하였는데, pH를 산성(pH 3), 중성(pH 7), 알카리성(pH 10) 3가지 상태로 유지하면서 변화를 조사하였다. 막의 특성과 원수에 존재하는 물질의 특성에 따라서 변화를 다양하게 나타나겠지만, 산성인 경우에는 압력의 증가가 매우 빠르고 플럭스의 감소가 매우 신속히 진행되는 반면, 알카리성인 경우에 여과지속시간이 훨씬 길어지고 플럭스의 감소도 가장 낮아 생산량이 많이 증가하는 현상을 발견할 수 있었다. 이는 응집처리 후에 잔존하는 콜로이드물질 등이 알카리성 상태에서 재응집이 일어나서 막의 표면에 여과층을 형성하여 세공을 막을 수 있는 입자나 분자를 걸러주는 역할을 하기 때문인 것으로 보이며, 응집처리 후에 막분리 공정을 투입하는 경우는 필히 pH를 알카리성 상태로 유지하는 것이 수처리 공정에서 유리하리라고 판단된다(Fig. 32~33).

나. 활성탄과 염화칼슘 투입에 따른 막오염 조사

정밀여과막의 오염도를 줄이는 방법으로 세공 주변의 여과 공간을 늘리는 방법을 예상할 수 있는데, 세공보다 약간 큰 크기의 분말활성탄을 응집공정 후에 일정량 투입하여 전처리하였을 경우 막오염도를 획기적으로 줄일 수 있는 것을 발견하였다. 보편적인 견해로는 막오염을 증가시켜 멤브레인의 성능을 감소시킬 것으로 생각되나 실제로는 막의 오염을 방지하여 막의 수명을 향상시키는 것을 알 수 있었다. Fig. 34~35에서 보는바와 같이 활성탄의 투입량이 증가할수록 투과압력의 증가가 늦어지고 플럭스의 감소도 늦어져서 막의 수명을 증가시키는 것을 알 수 있었다. 이는 활성탄 투여량이 증가함에 따라 유기물 흡착량이 증가하여 플럭스감소를 지연시키는 효과를 주는 것으로 예상되며, 활성탄 흡착공정을 포함한 복합공정의 도입으로 인해 막의 수명을 증대시킬 수 있을 것으로 기대된다.

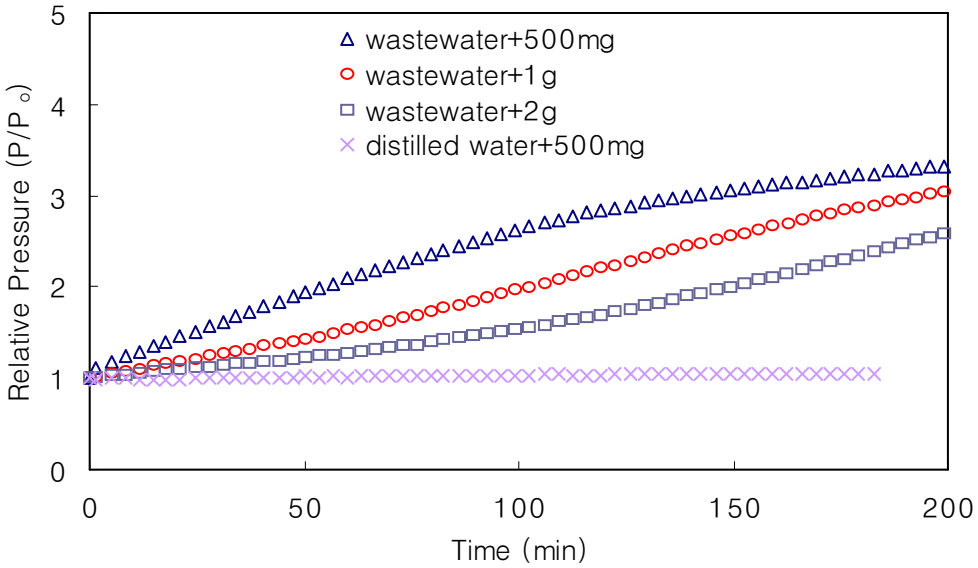


Fig. 34. Variation of pressure according to PAC dose on MF membrane process

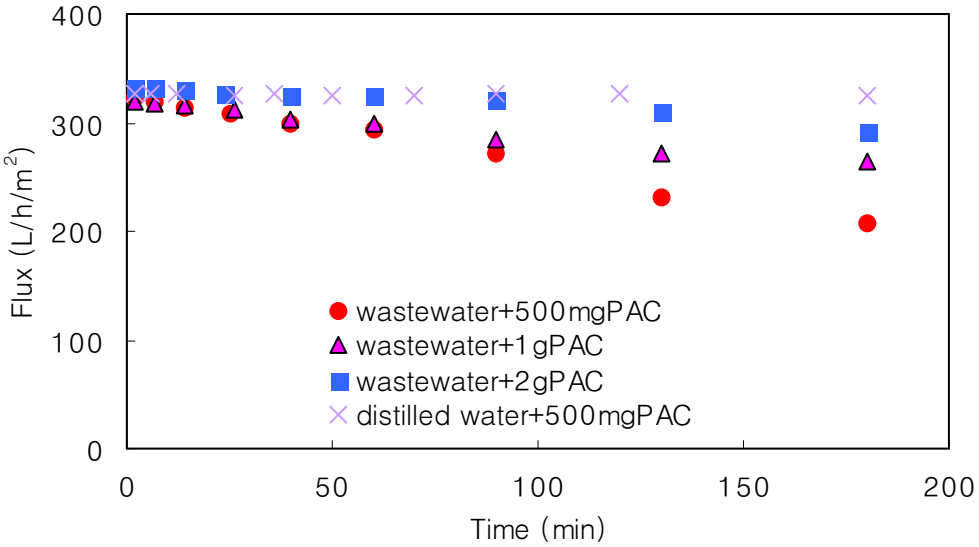


Fig. 35. Variation of flux according to PAC dose on MF membrane process

또한 원수의 pH와 활성탄의 투여량에 동시에 변화를 주었을 때의 압력 변화와 플럭스의 변화를 조사한 결과, 활성탄이 투입되는 경우에는 pH의 변화에 민감하게 작용하지 않는 것으로 나타나 활성탄이 사용되는 경우는 원수의 pH에 크게 신경을 쓰지 않아도 되는 것으로 조사되었다. 특히 Fig. 36과 Fig. 37에서 활성탄이 투입되지 않은 경우와 투입된 경우를 비교하면 활성탄의 투입으로 인하여 여과압이 감소되고 플럭스가 현저히 증가됨을 알 수 있다.

결과적으로 하수처리장 방류수의 이용에 막분리 공정을 도입할 경우에는 활성탄 처리공정과 막분리 공정을 조합하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

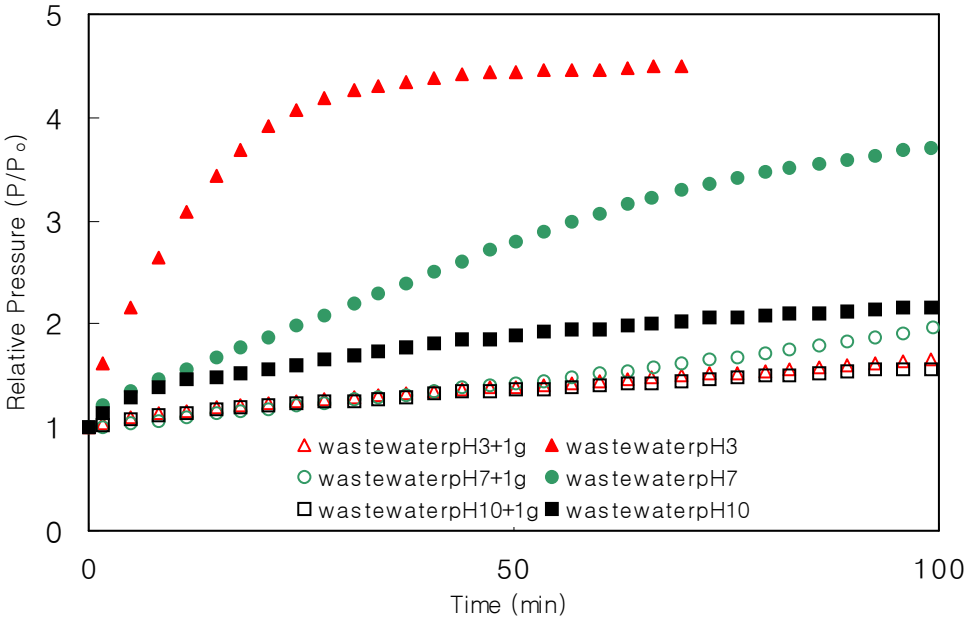


Fig. 36. Variation of filtration pressure according to PAC dose and pH on MF process

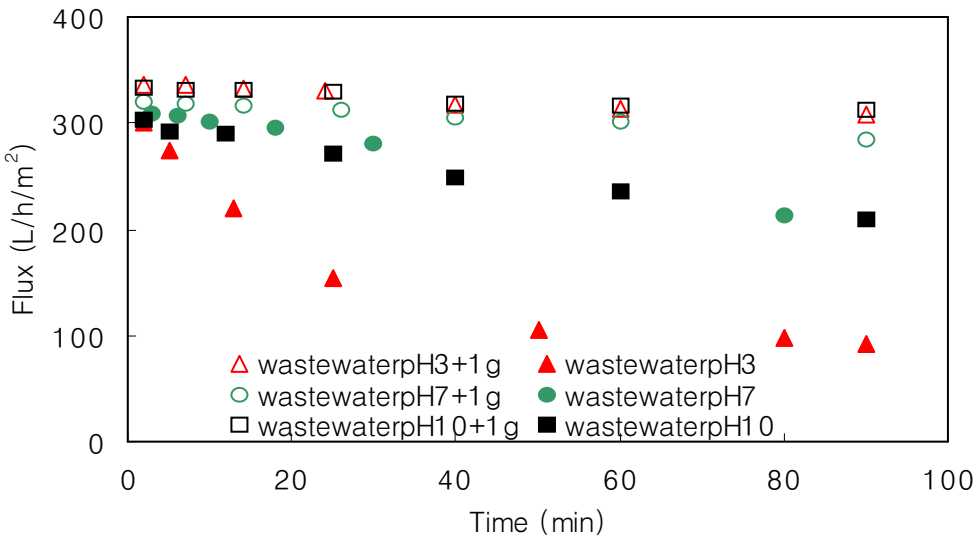


Fig. 37. Variation of flux according to PAC dose and pH on MF membrane process

Table 26. Variation of zeta potential according to PAC and $CaCl_2$ dosage

Condition	Zeta potential(mV)
Wastewater pH 3	-8.22
Wastewater pH 3+PAC 1g, after 2min	+11.58
Wastewater pH 3+PAC 1g, after 160min	-10.13
Wastewater pH 10	-5.45
Wastewater pH 10+PAC 1g, after 2min	-19.92
Wastewater pH 10+PAC 1g, after 100min	-18.2
Wastewater pH 7	-16.24
Wastewater pH 7 + 0.1 mol/L $CaCl_2$	-3.12

막오염을 줄일 수 있는 또 다른 하나의 방법으로 원수에 $CaCl_2$를 첨가하여 응집 보조제로서의 역할을 하게 함으로서 Zeta potential을 0 부근으로 변화시켜 막과의

반발 전하차를 줄여주어 막오염을 줄이는 방법이 있다.

Table 26은 $CaCl_2$를 첨가할 경우, pH 변화를 줄 경우, 활성탄을 첨가할 경우 Zeta potential의 변화를 나타낸 것이다. 실제로 $CaCl_2$를 첨가하였을 경우 Zeta potential이 0에 가까워지고, 이는 세공의 오염물질을 응집으로 크기를 증대시켜 압력의 증가와 플럭스의 감소를 방지하는 효과가 발생한 것으로 일정농도의 $CaCl_2$를 응집과 활성탄 공정에 추가적으로 첨가하면 멤브레인의 연속처리공정에 매우 큰 효과를 줄 수 있을 것으로 판단된다(Fig. 38~39).

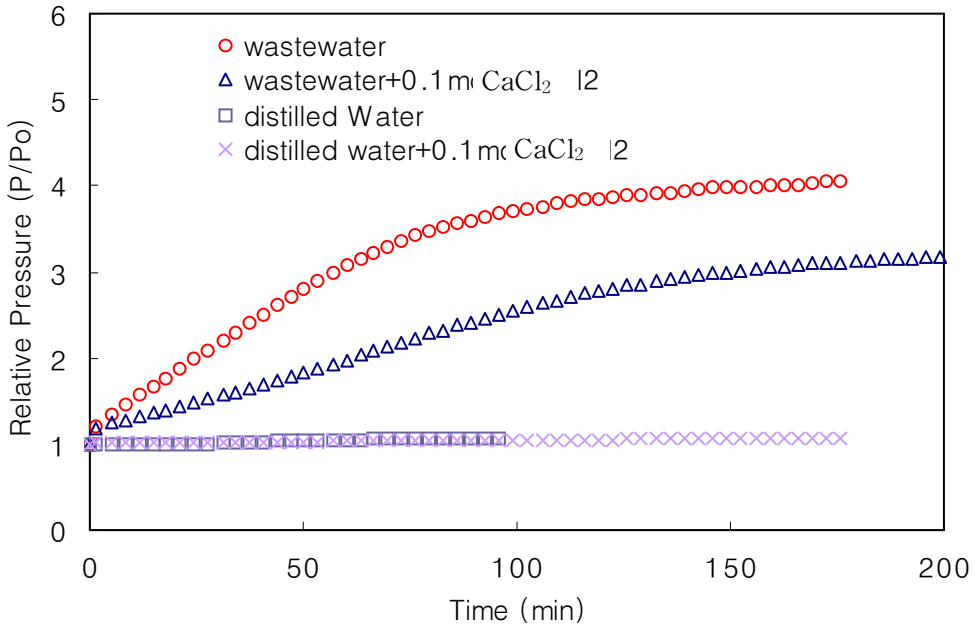


Fig. 38. Variation of filtration pressure according to $CaCl_2$ dose on MF process

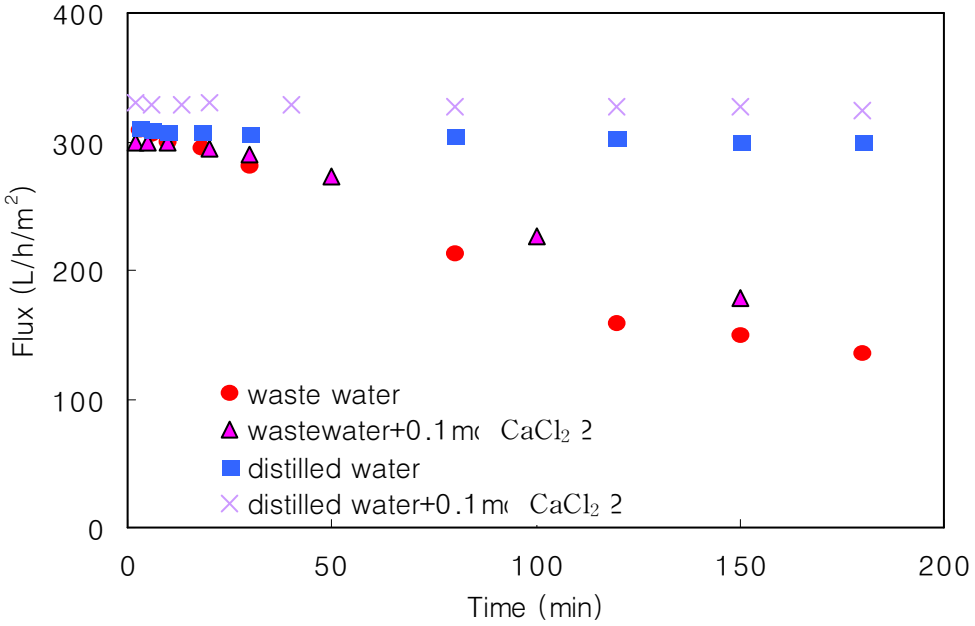


Fig. 39. Variation of flux according to $CaCl_2$ dose on MF membrane process

제6절 연속처리공정

1. 응집-흡착-막분리 공정

지금까지의 각 개별공정에서 확립한 최적조건을 활용하여 응집-흡착-막분리의 연속처리공정 연구를 실시하였다. 먼저, 방류수에 응집제로 PAC 100㎎/L를 첨가하여 급속혼화지와 완속응집지를 거친 후 침전지에 4시간 이상 체류하면서 처리된 상등수는 펌핑에 의해 활성탄/막분리 반응조로 이송되고, 활성탄이 첨가된 상태에서 막분리 공정을 통과하게 된다. Fig. 40은 연속처리공정의 흐름도를 보여주고 있으며, 막공정에서는 일정한 막 투과속도를 유지하면서 변하는 압력과 유속을 측정하여 플럭스감소를 확인하였다.

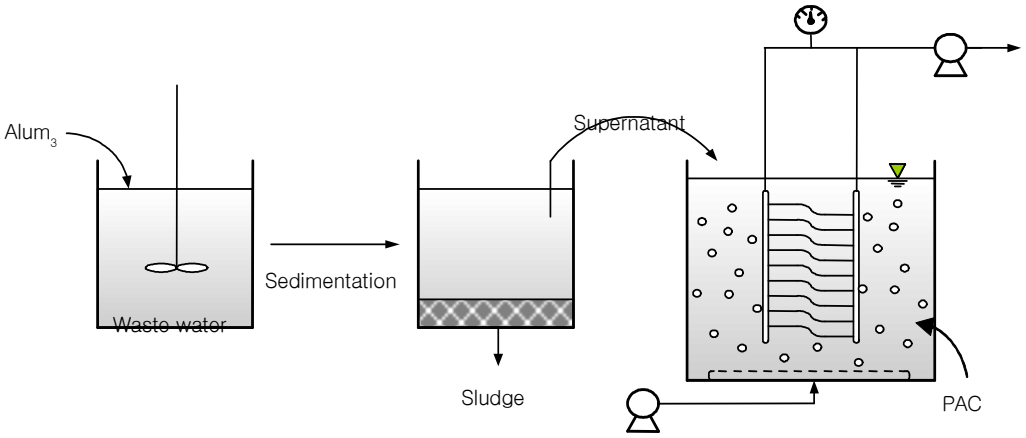


Fig. 40. Schematic diagram of coagulation/adsorption/membrane hybrid system

연속처리공정을 응집-흡착-막공정의 순으로 적용하고자 하는데는 몇가지 이유가 있는데, 첫째 응집에 의해 막오염에 영향을 줄 수 있는 유기물과 콜로이드 물질을 많은 양 제거하고, 둘째 잔류 유기물을 활성탄에 의해 제거하면서 막오염을 방지하고, 막의 수명을 향상시킬 수가 있기 때문이다. 이는 상기에서 실험한 결과를 통해 확인할 수가 있었다.

연속처리공정에 대한 플럭스변화를 보면 단일막공정에 비해 응집/막공정은 10배 정도, 응집/흡착/막공정은 30배정도 효과적인 것으로 나타났다(Fig. 41). 이러한 결과를 봤을 때, 막의 오염이 급격히 일어나서 역세척주기를 빠르게 처리해야하므로 약품비 및 공정 휴식기 등을 고려한 생산성이 떨어지는 단일막 공정의 단점을 복합공정으로 보완할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 응집/흡착/막분리 연속처리공정을 사용한 경우, 역세척주기가 막분리만 단일공정으로 사용한 경우보다 30배 이상 길어지므로 운전비용을 현저히 낮출 수 있으며, 가역·비가역적 막오염을 방지할 수 있어 막의 수명을 늘릴 수 있게 된다.

또한 연속처리공정에서 압력변화를 자세히 관찰하면 직선의 기울기가 한 번 변하는 모습을 볼 수 있는데 이는 활성탄의 최대 흡착점으로 이때 추가로 활성탄을 첨가하여 세척 주기를 더욱 길게 할 수 있을 것으로 예상된다. 이는 운전조건의 변화를 통한 막오염을 방지하는 기법으로 역시 생산단가를 최대한 줄일 수 있게 된다.

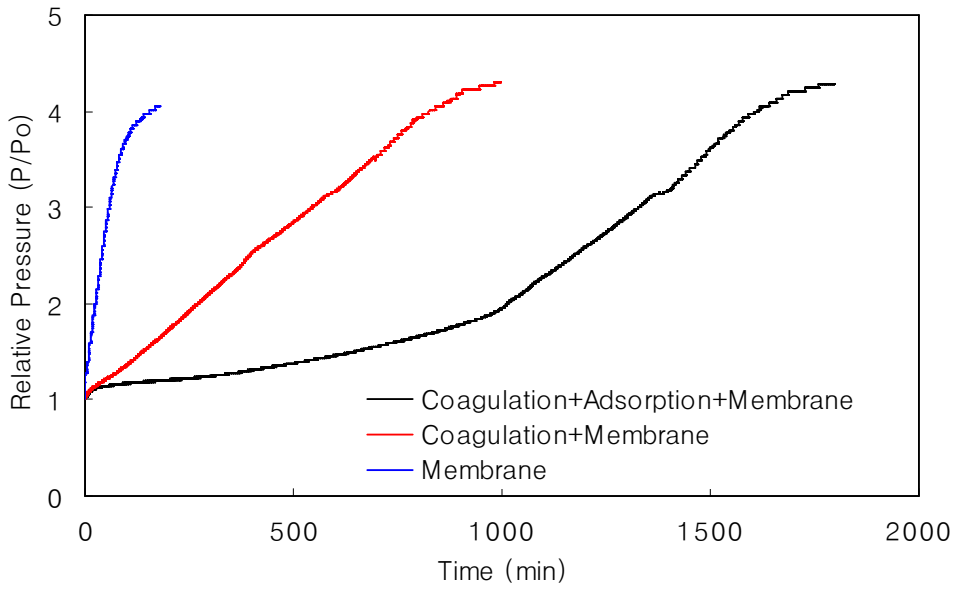


Fig. 41. Variation of pressure according several processes

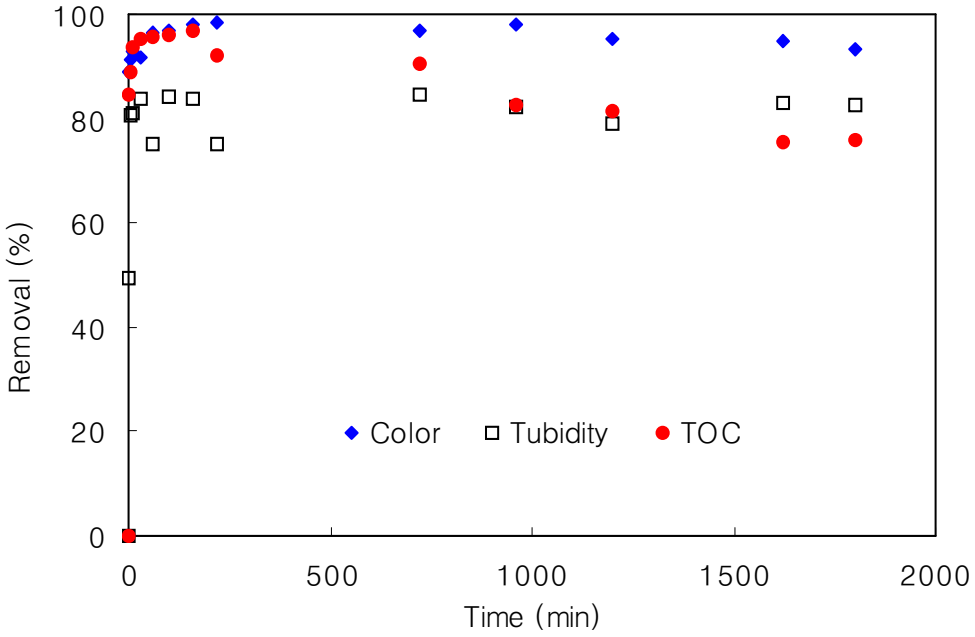


Fig. 42. Removal rates of color, turbidity and TOC on MF membrane process

연속처리공정 실험을 30시간 동안 진행하였고, 실험 중 생산된 유출수의 색도, 탁도, TOC를 검사한 결과 평균적으로 색도는 1이하, 탁도는 0.3~0.4이하, TOC는 0.5정도 수준으로 먹는 물 수준임을 알 수 있다. 또한 각각의 제거율은 색도는 98% 정도, 탁도 90%, TOC는 95%정도이며, 활성탄의 투입시기, 역세척조건 등 운전조건을 조절하면 이를 계속 유지할 수 있을 것으로 판단된다(Fig. 42).

2. 분자량 분포

수중의 분자량 분포를 측정하기 위해 폴리스타이렌 표준용액을 사용하여 검량선을 확보한 후에 검량선의 관계식으로부터 각 시료 중에 포함하고 있는 물질의 분자량을 상대적으로 비교하여 분자량 분포를 구하였다. 분자량별 Retention time과 분자량과의 상관식은 식 (3)과 같고, 표준액의 분자량 범위는 210~18,000 Dalton이다(Fig. 44).

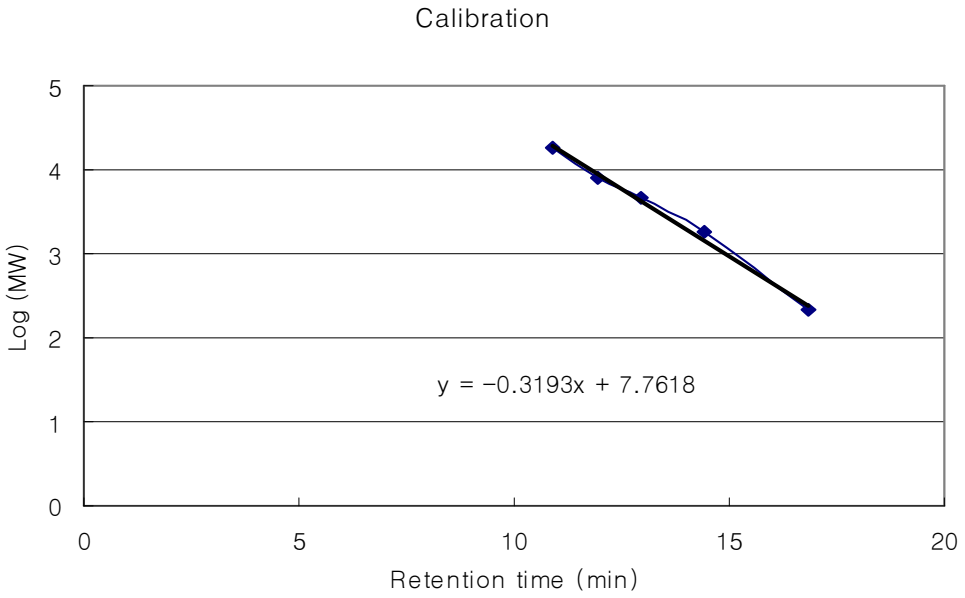


Fig. 43. Calibration of molecular weight and retention time

$$Log(MW) = -0.3193\ RT + 7.7618 \quad (3)$$

여기서, MW : 분자량, RT : Retention time

방류수 원수에서부터 각 공정별로 처리한 후에 측정한 분자량 분포 그래프로부터 구한 산술평균분자량, 가중평균분자량, 그리고 분산도를 Table 27에 표시하였고, 가중평균분자량으로 비교할 때 초기에 950 Dalton(Da.)에서 응집처리 후에 465 Da로, 응집과 멤브레인 통과 후에는 396 Da로, 응집과 흡착과 멤브레인 통과한 바로 직후(경과시간 0.1hr)에는 360 Da로, 그리고 동일하게 응집, 흡착, 멤브레인을 통과하고 12시간이 지난 후에는 337 Da로 감소하였지만 멤브레인 통과 후 16시간이 지나면서 분자량이 증가하고 있는 현상을 볼 수가 있었다. 이는 활성탄의 흡착능력이 다하고 멤브레인의 fouling이 극에 달해 분자량이 400 Da 이상인 물질들이 막을 통과해서 유출되었기 때문인 것으로 판단되며, 이 때 활성탄을 추가로 주입하든지 멤브레인을 역세척하여 fouling을 제거해 주어야 한다고 보는 것이다.

Table 27. Variation of RMW and polydispersivity according to processes

Treatment process	Number average RMW	Weight average RMW	Degree of polydispersivity
Raw water	526 Da	950 Da	1.808
Coagulation	318 Da	465 Da	1.465
Coagulation +Membrane	292 Da	396 Da	1.356
Coagulation +Adsorption +Membrane(0.1hr)	346 Da	360 Da	1.039
Coagulation +Adsorption +Membrane(12hr)	357 Da	337 Da	0.927
Coagulation +Adsorption +Membrane(16hr)	357 Da	398 Da	1.115
Coagulation +Adsorption +Membrane(30hr)	365 Da	404 Da	1.108

분산도 값을 비교해보면 이와 유사한 해석이 가능하다. 먼저 원수를 응집과 활성탄, 그리고 막처리 하였을 경우 분산도가 1에 근접하다가 막투과 12시간에서 1 이하로 감소했다가 시간이 증가할수록 분산도 값이 1 이상으로 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 막의 fouling이 일어난 지점과 역세척이 필요한 지점을 상대적으로 제시해 주고 있는 것이다. Fig. 44에서는 응집이나 활성탄 처리에 의해 500 Da 이상에 있는 물질들이 많이 제거되는 것을 보여주고 있고, Fig. 45에서는 응집과 활성탄 처리 후 멤브레인 처리시 초기에는 400 Da 부근의 물질이 50% 정도까지 제거되었다가 다시 시간이 지나면서 처리 후 12시간이 경과되었을 때부터 400 Da 이상의 물질들이 제거될 않고 유출되는 현상을 보여주고 있다. 본 연구를 통해 살펴보면, 응집, 활성탄, 막공정의 복합공정에 의해서도 400Da 부근의 물질들은 완전히 제거되지 않고 일부량이 유출되는 것을 분자량분포 자료를 통해 파악할 수가 있었다.

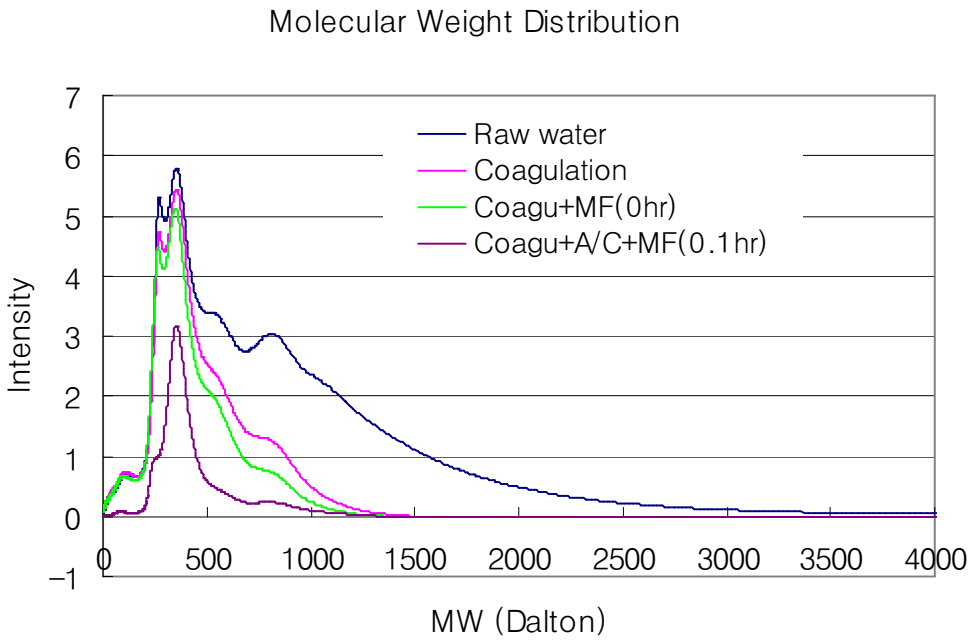


Fig. 44. Variation of molecular weight distribution according to processes

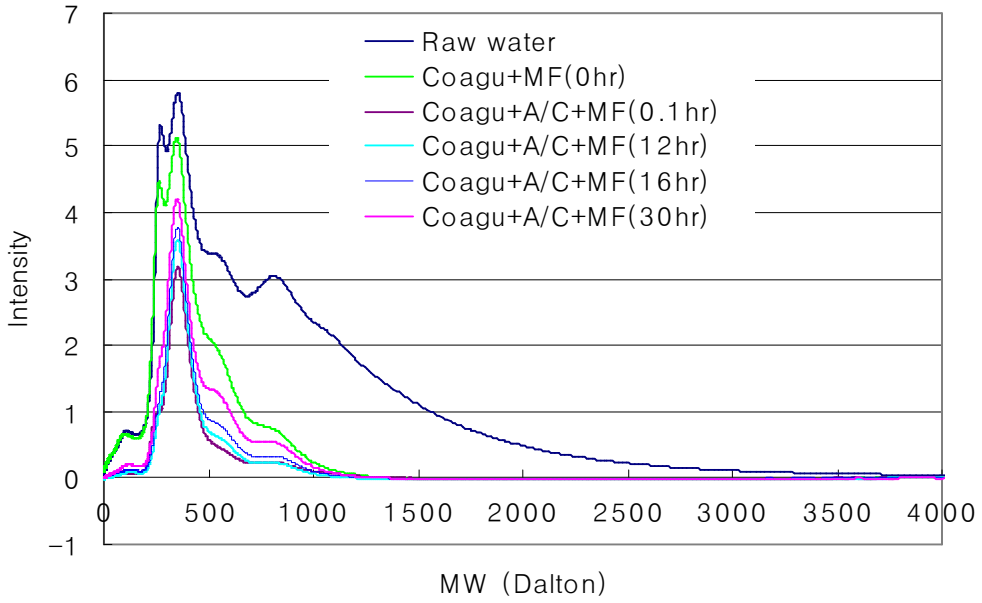


Fig. 45. Variation of molecular weight distribution according to the time passed after membrane treatment

3. 최종처리수의 수질조사

광주하수처리장 2단계 방류수를 원수로 하여 응집, 흡착 및 막분리 공정을 통과한 최종 처리수의 수질을 분석한 결과는 Table 28과 같다. 방류수 수질기준, 중수 수질기준, 목표수질기준(목욕용수) 등과 비교하여 최종처리수의 수질이 매우 양호한 것으로 조사되었다. T-N의 제거효율만 낮아 질소 제거를 위한 고도처리공정의 도입에 필요할 것으로 보이며, 이취미의 경우는 활성탄의 처리에 의해 제거가 가능하리라고 본다. 단지 미생물에 의한 영향을 고려하여 최종 처리수에 대한 소독공정을 추가하면 중수의 용수로서 공급하는데 전혀 문제가 없을 것으로 판단된다.

Table 28. Water quality of finally treated by coagulation/adsorption/ membrane (unit : ㎎/L)

구분 / 항목	방류수 수질기준	중수 수질기준	목표수질기준 (목욕용수)	방류수원수	최종처리수
BOD	20 이하	10 이하	-	3.3	0.5
COD	40 이하	20 이하	-	8.8	0.8
SS	20 이하	-	-	1.5	0.1
색도(도)	-	20 이하	5 이하	28	1
탁도(NTU)	-	2 이하	0.5 이하	0.8	0.3
냄새	-	불쾌한냄새 없을것	무	유(미취)	무
외관	-	불쾌감없을 것	-	양호	양호
잔류염소	-	0.2 이상	(0.2~4.0)	0.3	-
총대장균군 (개/mL)	3000 이하	검출되지 않을것	불검출	0	-
일반세균 (개/mL)	-	-	100 이하	-	-
염소이온	-	-	200 이하	89	59
T-P	8 이하	-	0.1 이하	1.320	0.005
T-N	60 이하	-	-	21.820	18.957
ABS	-	-	0.5 이하	0.17	0.00
경도	-	-	300 이하	87	75
Fe	-	-	0.3 이하	0.02	0.02
Mn	-	-	0.3 이하	0.084	0.038
Hg	-	-	(불검출)	0.000	0.000
As	-	-	(0.005 이하)	0.000	0.000
pb	-	-	(0.05 이하)	0.000	0.000
Cd	-	-	(0.005 이하)	0.000	0.000
Cr	-	-	(0.05 이하)	0.000	0.000
DOC	-	-	1 이하	4.0	0.50
pH	-	5.8~8.5	(5.8~8.5)	7.2	6.65
$KMnO_4$소모량			10 이하	-	2.7
증발잔류물			500 이하	-	112
Cond. (㎲/㎝)	-	-		636	507

※ ( ) 안은 먹는물 수질기준임

제7절 중수 이용 방안

아무리 좋은 방류수 재처리공정을 확보한다 하더라도 실제로 적용할 수 있는 만큼의 경제성이 없으면 이용하기가 힘들다. 방류수 이용에 따른 전체 투자비용이 산출되어야 하나 실제로 정확한 자료를 산출하기가 어렵고 사회적 편익 추정방법에 의해 비용-편익분석을 실시하여야 하나 이를 시행하지는 못했다. 본 연구에서는 방류수 이용을 위한 재처리시설의 시설 용량별 초기 시설투자비와 운영비용에 대한 경제성 분석을 실시하였다(제주도광역수자원관리본부, 2003).

광주하수처리장 방류수를 중수로 이용하는데 소요되는 비용은 크게 초기투자비와 운영비용으로 구분하여 산정할 수 있다. 초기투자비는 재처리시설 설치에 소요되는 고정비용으로 처리시설의 규모, 처리공정, 방류수의 수질, 이용 용도와 목표 수질 등을 고려하여 시설 설치에 소요되는 비용을 산출하였다. 운영비용은 재처리시설을 운전하는데 소요되는 시설관리비, 약품비 및 전력사용요금 등이 주를 이룬다.

1. 방류수 처리공정

방류수 재처리를 위한 공정도는 원수 집수조 → 응집제 투입조 → 급속혼화조 → 완속응집조 → 활성탄 투입조 → 막분리 여과조 → 소독조 → 처리수 저장조 등으로서 응집 후 침전조가 저류조만 거친 후 활성탄/막분리 혼합조에서 불순물이 분리가 되어짐에 따라 시설면적이 감소하고, 초기투자비용이 줄어들게 된다. 특히 응집공정과 활성탄 공정이 막분리공정에 연속처리공정으로서 운영됨에 따라 막의 오염(Fouling)이 현저히 줄어들고 막의 수명이 증가하게 되어 운영비용이 줄어들게 된다.

설계기준을 살펴보면 다음과 같다.

- 시설용량은 50,000㎥/일을 기준으로 하였음
- 설비의 수명은 15년으로 함
- 막(Membrane)은 역세형 정밀여과막으로 세공경이 0.3~0.4 ㎛이며, 일반적으로 평균 수명이 4년 정도이나 연속처리공정에 사용함으로서 수명이 증가하여 15년으로 예상함

· 응집제는 Alum(Poly aluminium sulfate)이고, 적정 투입량은 100 ㎎/L임
· 활성탄의 투입량은 50 ㎎/L이고, 중수용 석탄계 활성탄을 사용함
· 마지막 소독공정은 하수처리장에 설치되어 있는 기존의 소독시설을 사용함
· 역세척 과정에서 발생한 슬러지는 농축조로 보내고 상등수는 유입 원수 라인으로 반송함

2. 초기투자비 및 운전비용 산정

가. 방류수 처리시설의 설치비

○ 광주광역시 하수처리장 방류수를 전술한 설계기준에 의해 1일 50,000㎥(처리수 기준)을 생산할 수 있는 재처리시설을 설치하는데 소요되는 초기투자비를 산정한 결과는 Table 29과 같음.
○ 초기 시설투자비의 주요 항목은 토목공사비(재처리시설), 분리막설비 및 기계, 전기 계장, 설치 및 시운전 등이며, 각 항목의 투자비와 비율은 Table 29에 제시한 바와 같음.
○ 총 소요비용에서 분리막 설비 부분이 59.4%를 차지하고 있고, 토목/건축 부분이 17.2%, 기계부분이 12.5%, 전기 계장 4.7%, 설치 및 시운전과 기타 순으로 소요되었음.

Table 29. Requirement cost for the secondary treatment facility of 50,000㎥/day

항 목	투자비(억 원)	백분율(%)
토목/건축	55	17.2
분리막 설비	190	59.4
기계	40	12.5
전기 계장	15	4.7
설치 및 시운전	10	3.1
기 타	10	3.1
합 계	320	100

나. 운전비용

○ 1일 50,000㎥의 재처리시설을 운전하는데 소요되는 운전비용을 산정한 결과는 Table 30과 같음.

○ 산정결과 ㎥당 생산원가는 216.5원으로 분석되었으며 감가상각비가 전체의 54.7%로 가장 높은 비율을 차지하고 전력비는 15.3%를 점유하고 있음.

○ 이 같은 생산원가는 인천광역시 가좌하수처리장 방류수를 12,000㎥/일 재처리하여 공업용수로 이용하고 있는 (주)INI STEEL사의 실제 운영비용 305원/㎥과 비교할 때 훨씬 저렴하며, 감가상각비를 제외할 경우에는 ㎥당 생산원가가 98.0원으로 낮아짐.

Table 30. Operating cost for the secondary treatment facility of 50,000㎥/day

항 목	운전비(원/㎥)	백분율(%)
인 건 비	8.7	4.0
전 력 비	33.2	15.3
약 품 비	46.0	21.2
유지보수비	3.2	1.5
기타경비	6.9	3.2
감가상각비	118.5	54.7
합 계	216.5	100

3. 국가 경제적 측면에서의 비용 절감효과

광주하수처리장 2단계 시설의 방류수 50,000 ㎥/일을 중수로 이용할 경우 경제적 측면의 비용절감효과는 다음과 같다.

- ○ 원수를 확보하기 위한 댐건설 비용이나 수변지역 관리비용, 생태계 파괴로 인한 경제적 손실이 감소된다.
- ○ 저렴한 시설비로서 중수 시설을 설치할 수 있으며, 수돗물을 생산하기 위한 정수장 건설비용이 절감된다.
- ○ 시민들의 상・하수도 요금 및 물이용 부담금이 절감된다.
- ○ 응집-흡착-막분리 연속처리공정을 실용화할 경우 수자원 확보 효과가 크다.
- ○ 응집-흡착-막분리 연속처리공정을 실용화함으로써 정부의 중수 확대정책을 견인할 수 있다.
- ○ 응집-흡착-막분리 연속처리공정을 저렴한 비용으로 시군 규모의 중소형 하수처리장에 설치하여 부족한 수자원을 확보한다.
- ○ 정부의 수돗물 생산원가인 596.6원/㎥에 비해 저렴한 비용으로 고급 중수를 생산하여 목욕용수나 세탁용수로 공급할 수 있다(2003년 기준임).
- ○ 광주광역시 수돗물 공급단가인 가정용 371.5원/ton, 욕탕용 495.0원/ton, 업무용 751.8원/ton, 공업용 450.1원/ton에 비해, 응집-흡착-막분리 연속처리공정으

로 생산한 중수비용은 300원/ton으로써 매우 저렴하여 욕탕용수, 공업용수, 화장실 세정수 등으로 사용할 경우 경제성이 있다(2003년 기준임).

제5장 결 론

광주하수처리장 2단계 시설의 방류수를 중수로서 이용하기 위해 응집, 흡착, 막분리 공정과 연속처리공정으로 실험하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 2004년도 하수처리장 방류수의 수질을 분석한 결과 중수의 수질기준에 부적합한 항목은 T-N, T-P 및 냄새유발물질이며, 그 외에 관로에 스케일, 부식 및 부착성 생물막을 생성할 수 있는 조류가 45종 출현하였다. 하절기에 출현한 미생물은 조류 30종 (남조류 5종, 규조류 7종, 녹조류 14종, 유글레나류 3종, 황색편모조류 1종), 원생동물 3종, 선충류 1종, 윤충류 2종, 세균류 1종 및 기타 1종이었다.

2. 응집공정에 적합한 응집제별 주입농도는 Alum 100㎎/L, PAC 80㎎/L이다.

3. 색도와 T-P, TOC 등의 처리효율은 응집제의 주입량에 따라 증가하였으며, 색도 처리효율은 Alum 300㎎/L주입할 때 60%, PAC 350㎎/L를 주입할 때 66%이었다.

4. T-P 처리효율은 Alum 100㎎/L 주입할 때 90%, PAC를 100㎎/L 주입할 때 92%이고 응집의 적정 pH는 5.0~7.0이었다.

5. 분말활성탄의 흡착평형실험 결과, 석탄계 분말활성탄이 야자계 분말활성탄보다 흡착능이 우수하였으며, 피흡착질의 크기와 활성탄의 미세공과 연관성이 크기 때문이다.

6. 정밀여과막의 세척액으로서 0.4% NaOCl이 효과적이었고, 여과전에 활성탄과 $CaCl_2$를 사용할 경우 세공막힘 현상이 감소되었다.

7. 시료의 pH를 알카리성으로 유지할 때 막의 수명이 증가하고, Zeta potential 0 부근에서 막과의 반발 전하차가 줄어들어 막오염이 감소되는데, 응집제와 활성탄을 첨가함으로써 막의 수명이 각각 10배 및 30배 증가되었다.

8. 응집처리함으로써 방류수의 가중평균분자량이 950 Da에서 465 Da로, 응집-멤브레인 처리함으로써 396 Da로 감소하였다. 분자량 400 Da 부근의 물질들은 응집과 흡착공정에서 거의 제거되지 않았다.

9. 광주하수처리장 방류수를 응집, 흡착 및 막분리 공정으로 처리한 후, 질소와 미생물을 제거하기 위한 고도처리시설 및 염소 또는 오존처리 등 소독시설을 조합한다면 중수의 수질기준에 적합할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Ali, W., C. R. o'Melia and J. K. Edzwald, "Colloidal stability of particles in lakes : Measurement and significance", *Water Sci. and Technol.*, **17**, 701, 1985.
2. Billy H, Kornegay and Keith J. Kornegay: *Natural organic matter in drinking water: Recommendations to water utilities,* 2000, 1:22.
3. Bourbigot, M. M., Cote, P. and Agbekodo, K., "Nanofiltration: An advanced process for the production of high quality drinking water", *Proceedings of the AWWA/IWSA Membrane Technology Conference*, Baltimore, USA, August 1993.
4. Chin, Y., G. Aiken, and E. O. Loughlin, "Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic substances", *Environ. Sci. Technol.*, **28**, 1853-1858, 1994.
5. Clark, M. M., "Ultrafiltratin of lake water: Optimization of TOC removal and flux", chap.23 in Influence and Removal of Organics in Dring Water, Lewis Publishers, New York, 1992.
6. Davis, J. A., "Adsorption of natural dissolved organic matter at the oxide/water interface", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **46**, 2381, 1982.
7. Dey, B. K., Hashim, M. A., Hasan, S. and Sen, Gupta B., "Microfiltration of water-based effluents", *Advances in Environmental Research* 8, 455-466, 2004.
8. Edzward, J. K.; Van Benschoten, J. E: *Aluminum Coagulation of Natural Organic Matter. In Proceedings of Fourth International Gothenburg Symposium on Chemical Treatment*, Madrid, Spain, 1990.
9. Jeffree, M. A., J. A. Peakock, I. J. Sobey and B. J. Belhouse, *Clin. EXP.*

Dias. Apheresis, **5**, 373, 1981.

10. Laine, J. M. et al., "Effects of ultrafiltration membrane composition", *J. AWWA*, **81**(11), 61-67, 1989.
11. Malcom, R. L.; MacCarthy, P. *Envir. International* 1992, p18, 191.
12. Malcolm, R. L., Geochemistry of stream fulvic and humic substances. In *Humic Substances in Soil, Sediment, and Water: Geochemistry, Isolation, and Characterization. Edited by G. R. Aiken, D. M. McKnight, R. L. Wershaw and P. MacCarthy. NewYork : John Wiley and Sons.*, 1985.
13. Marianne, N., Arto, P., Riina, L. and Mika, M., "Influence of process conditions and membrane/particle interaction in NF of wastewaters", *Desalination*, 156, 379-387, 2003
14. Steinberg, G. and Muenster V. Geochemistry and ecological role of humic substances in lake wat er . In *Humic Substances in Soil, Sediment, and Water: Geochemistry, Isolation, and Characterization. Edited by G. R.Aiken, D. M. McKnight, R. L. Wershaw, and P. MacCar hy. NewYork : John Wiley and Sons.* 1985.
15. Tanghe, N., Kopp, V., Dard, S. and Faivre, M., "Application of nanofiltration to obtain drinking water", *Proceedings of Euromembrane* 92, Paris, 67-72, 1992.
16. Tipping, E. and D. C. Higging, "The effect of adsorbed humic substances on the colloid stability of heamatite particle", *Colloids and Surfaces*, **47**, 1393, 1982.
17. Thomas, D. G. and R. B. Gallaher, *Membrane digest*, **1**, 71, 1972.
18. Thurman, E. M. and Malcolm R. L. Preparative isolation of aquatic humic substances . *Environ. Sci. Technol.*, pp,463- 466, 1981.
19. Vickers, J. F., Willinghan, G. A., Parker, D. Y. and Schrott, D. F., Treatment of surface water using continuous microfiltration, *AWWA Conference on Membranes for Water Treatment*, 1993.

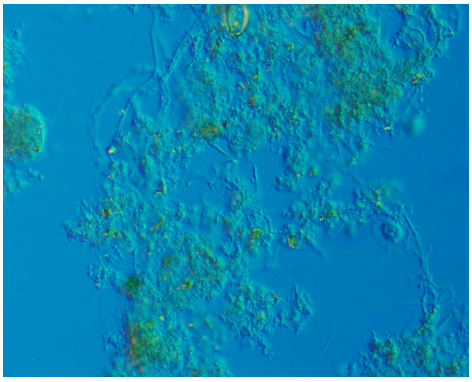
20. Vigneswaran, S. and Boothanon, S., "Cross-flow microfiltration with in-line flocculation", *Water*, 29-31, 1992.
21. Vigneswaran, S., Ngo, H. H. and Visvanathan, C., "Comparison of Membrane Hybrid System with Nanofiltration in Organic Removal", *Asia-Pacific Conference on Sustainable Energy and Environmental Technology*, Singapore, 64-71, 1996.
22. Wilson , A. L. Determination of fulvic acids in water. *J. App y Chemis.* 1959, pp ,501- 510.
23. White, M. C.; Thompson, J. D.; Harrington, G. W.; Singer, P. C. J.-Am *Water Works Assoc.*, 89(5); 64, 1997.
24. Yang, R. T., "Gas separation by adsorption processes", Butterworth Publishers, 64, 1987.
25. 광주광역시, "광주천 유수원(희석수)취수시설 실시설계보고서", 2000. 11
26. 광주광역시, "광주천정비 종합기본계획 보고서", 2004. 08.
27. 광주광역시, "물의 효율적 이용 및 합리적 수요관리 방안 - 우리나라 물수요관리 효과분석(최지용)", pp33～42, 2004. 1.
28. 박석기 외 2명, "해설 먹는물의 수질관리(약수, 생수, 먹는물 및 먹는 샘물)", (주)동화기술, 1996.
29. 유태종, "광주광역시 하수처리수 이용 방안", 광주지역환경기술개발센타, 2002. 2.
30. 이성우 외 4명, " 고도상수처리 - 원리 및 응용 -" 동화기술, 2003.
31. 제주도광역수자원관리본부 등, "제주지역 하수처리장 방류수 이용 방안 연구 보고서(Ⅰ)", 2003. 10.
32. 조봉연 편저, "막여과, 이론과 실재", 1999.
33. 조재원, "멤브레인 공학", 2004.
34. 眞田雄三 외 2명 저, 박영태 역, "활성탄, 기초와 응용", 동화기술, 2001.
35. 환경부, "2003년 환경관계법규Ⅱ(수질편)", 홍문각, 2003.

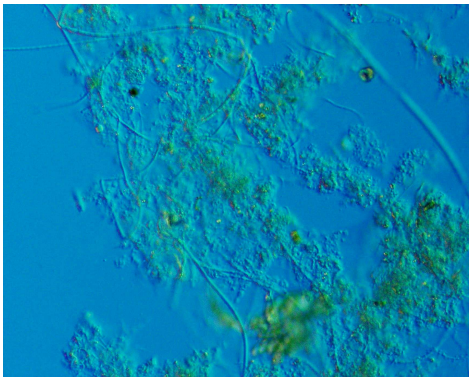
36. 환경부, “수질오염총량관리 업무편람” 2004. 3.
37. 환경부, “중수 이용확대를 위한 정책방안 연구(Ⅰ)”, 한국환경정책・평가연구원, 1999. 6.

APPENDIX

APPENDIX 1. 광주 제*1*하수처리장 최종침전지에서 발견된 생물종

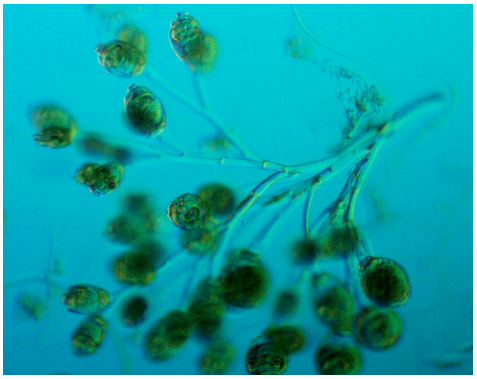
가. 플록과 함께 엉켜있는 생물들



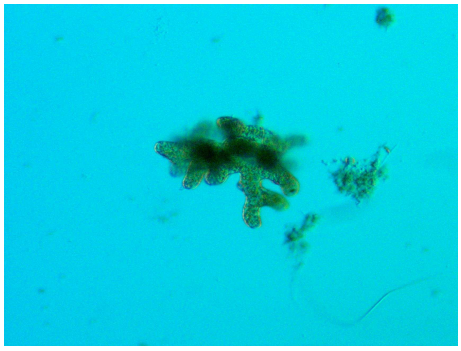


나. 원생동물

Arcella(원생동물)

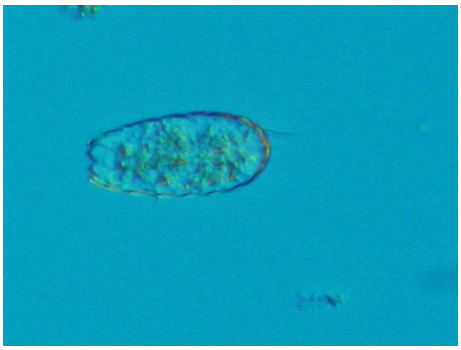


Epistylis(원생동물)

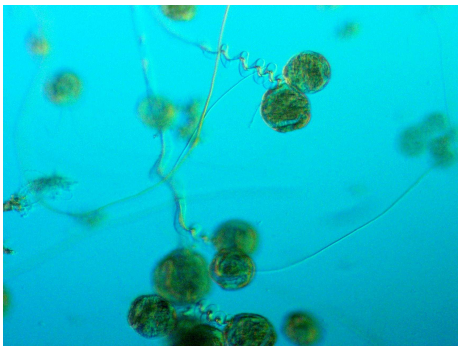


Amoeba(원생동물)

Paramecium(원생동물)



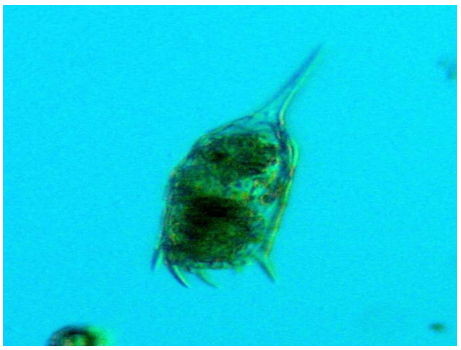
Euglypha(원생동물)



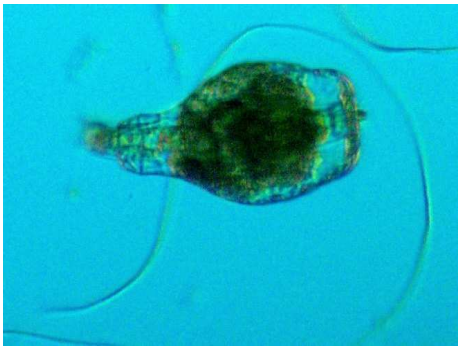
Vorticella(원생동물)

다. 윤충류

Lepadella(윤충류)

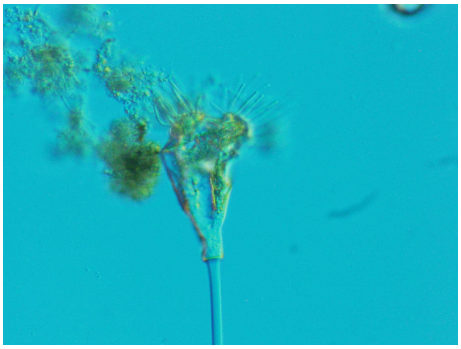


Keratella(윤충류)



Philodina(윤충류)

라. 흡적충류

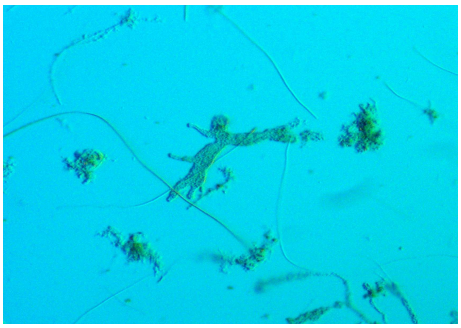


Tokophrya (흡적충류)

마. 선충류

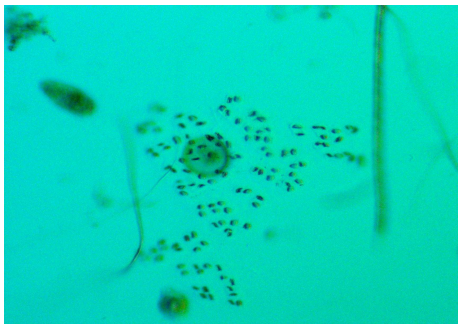
선충류

바. 세균류

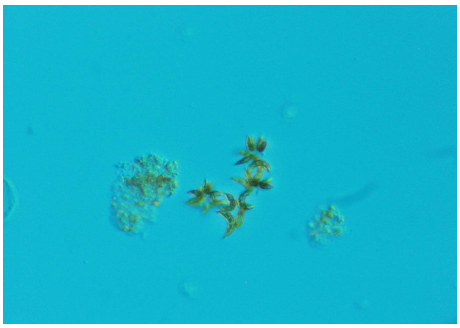


Zoogloea(세균류)

사. 녹조류

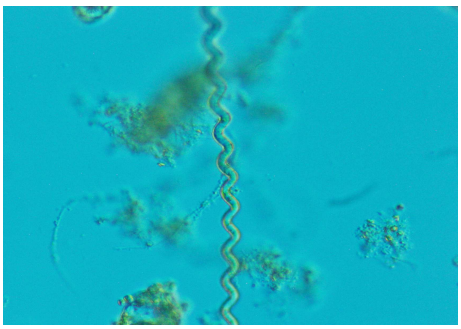


Coccomyxa(녹조류)



Selenastrum(녹조류)

아. 남조류



Spirulina(남조류)