



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

용수공급을 위한
삼양 3수원 담수화 공정에 관한 연구



濟州大學校 産業大學院

環境工學科

金 于 燦

2014 年 12 月

용수공급을 위한
삼양 3수원 담수화 공정에 관한 연구

指導教授 金 鎮 瑾

金 于 燦

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2014 年 12 月



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

金 于 燦의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 甘 相 奎 印

委 員 趙 恩 一 印

委 員 金 鎮 瑾 印

濟州大學校 産業大學院

2014 年 12 月

목 차

Summary	vii
I. 서 론	1
II. 문헌 고찰	3
1. 국내·외 물 부족 현황	3
2. 제주도 용수 공급 현황	4
3. 삼양 3수원의 특성	5
4. 담수화 기술	7
4.1. 담수화 기술의 정의	6
4.2. 염분농도에 따른 물의 분류(TDS기준)	10
4.3. 담수화 공법의 종류	11
4.4. 담수화 전처리 공법 및 특징	25
III. 연구방법	31
1. 연구 대상	35
2. 실험 장치	50
3. 실험 방법	41
IV. 결과 및 고찰	43
1. 파일럿 플랜트 운전결과	43
1.1. 전처리 공정	43
1.2. 담수화 공정	50
1.3. 전처리 공정 경제성 평가	51

2. 경제성 평가-----	55
2.1. 담수화 공정 도입 경제성 분석-----	55
2.2. 지하수 개발 경제성 분석-----	60
2.3. 담수화 공정 도입 타당성 평가-----	64
V. 결 론-----	68
참고문헌-----	69



List of Table

Table 1. The current status of the facilities in Samyang 3 catchment area	5
Table 2. The components of sea water	8
Table 3. The current conditions of desalination plants by country	11
Table 4. The current conditions of VC by country	16
Table 5. The comparison on characteristics of the evaporation methods	17
Table 6. The evaluation criteria for the preconditioning equipment by SDI ₁₅	28
Table 7. The outline of the facilities subject to study	31
Table 8. water quality standard and current quality state of Samyang 3 catchment area (2006.6~2010.11)	35
Table 9. Equipment specifications of the Pilot Plant (1)	39
Table 10. Equipment specifications of the Pilot Plant (1)	40
Table 11. Establishing operation methods of model experiments (Testing the operation of preconditioning equipment)	41
Table 12. Preconditioning and turbidity removal capacity by reverse osmosis membrane	52
Table 13. The costs of setting up as well as operating and maintaining preconditioning equipment (50m ³ /day)	54
Table 14. The total operating expenses of desalination facilities (during a 30-year period)	55
Table 15. Analysis of the cost of desalination facilities	56
Table 16. Analysis of the cost of desalination facilities by activity	56
Table 17. The costs of operating and maintaining seawater desalination (4,000 m ³ /day)	58
Table 18. The costs of operating and maintaining seawater desalination (8,000 m ³ /day)	59
Table 19. The total operating expenses of the underground water development project (during a 30-year period)	60
Table 20. Analysis of the cost of underground water development faculties	61
Table 21. Development of Doryeon underground water (at an altitude of about 110 m)	62
Table 22. Development of Gyorae underground water (at an altitude of about 410 m)	62
Table 23. Analysis of the costs of developing as well as operating and maintaining underground water	63
Table 24. The findings of analyzing the economical feasibility of introducing seawater desalination	65
Table 25. Economic benefits and results of estimating expenses (Doryeon 4gong)	

+ Gyorae 4gong Development) -----	66
Table 26. Economic benefits and results of estimating expenses (Doryeon 5gong	
+ Gyorae 7gong Development) -----	67



List of Figures

Fig. 1. The groundwater shortage rate of the areas that suffer from water shortage	4
Fig. 2. The principles of the evaporation method	9
Fig. 3. The principles of the reverse osmosis method	9
Fig. 4. Multi-stage flash distillation (MSF)	12
Fig. 5. The operation of the multi-stage flash seawater desalination process	13
Fig. 6. Multi-effect distillation (MED)	14
Fig. 7. The forms and structures of the vapor compression method	16
Fig. 8. The principles of osmosis and reverse osmosis	18
Fig. 9. The membrane structure of cellulose acetate material	19
Fig. 10. The enlarged photos of cellulose acetate material	20
Fig. 11. The membrane structure of polyamide material	21
Fig. 12. The enlarged photos of polyamide material	21
Fig. 13. Spiral type module	22
Fig. 14. Carlsbed RO plant	23
Fig. 15. The principles of electro dialysis method	24
Fig. 16. The distribution diagram of reverse osmosis desalination facilities	26
Fig. 17. The mimetic diagram of multiple media filters	29
Fig. 18. The mimetic diagram of activated charcoal filters	30
Fig. 19. The distribution diagram of the treatment of Doryeon filtration plant	32
Fig. 20. Chlorine ion of Samwon 3 catchment area (June 2006~November 2010)	33
Fig. 21. Nitrate nitrogen of Samwon 3 catchment area (June 2006~November 2010)	34
Fig. 22. Turbidity of Samwon 3 catchment area (June 2006~November 2010)	34
Fig. 23. The composition of the process of the pilot plant	36
Fig. 24. The results of operating water temperature	43
Fig. 25. The results of operating hydrogen ion concentration (pH)	44
Fig. 26. The results of operating turbidity	45
Fig. 27. Influent characteristics of untreated water chromaticity	47
Fig. 28. The results of operating conductivity	48
Fig. 29. The results of operating chlorine ion	49
Fig. 30. The results of operating water flow	50
Fig. 31. The average SDI ₁₅ of preconditioned water by process	52
Fig. 32. The changes in SDI ₁₅ according to preconditioning	53

Summary

Over ninety-five percent of water supply of Jeju depends on underground water for living and farming. However, as the demand for water is rising sharply due to the promotion of large-scale development projects and an increase in the number of tourists, the water supply is expected to run short sporadically in some places for the summer season. Therefore, it is necessary to develop additional drinking water sources.

Even though developing underground water is regarded as the easiest way to deal with the water shortage issue, an increasing number of people worry that the underground water might be overexploited. In this regard, the ways to make use of the Samyang 3 catchment area, once developed as a drinking water resource but treated as an idle source of water supply because the chlorine ion concentration exceeded the water quality standard, will be examined in this study. The research composed the optimal preconditioning process according to the application of a desalination process with the purpose of demineralizing salinity, predicted water quality, and analyzed economic feasibility. In addition, the research compared it with the development of underground water and evaluated the economic feasibilities of both cases.

In order to analyze the feasibility, design factors were derived and the optimal preconditioning process was introduced by installing a 50-ton/day pilot plant. As a result, the study concluded that if steadily responding to changes in water quality of the untreated water and considering changes in volume of groundwater, it is appropriate to push ahead with the measures by dividing the institutional capacity of 8,000 m³/d into two steps.

The desalination process consists of several facilities for water intake, preconditioning, reverse osmosis, and postprocessing. For the preconditioning process, it was determined that after applying and testing a number of processes, it is most cost-effective to adopt multiple media filters composed of anthracite and filtering sand, taking into consideration the good quality of groundwater.

The operating result shows that the quality of the untreated water meets the quality standard of drinking water except for chlorine ion concentration, so it is possible to secure very stable water quality after treating it at the reverse osmosis desalination process. On top of this, based on the analysis, the production cost is less than 50% of freshening standard seawater.

According to the result of analyzing the feasibility for the implementation of the desalination process, it is economically feasible to introduce the desalination process at BC Ratio and the net present value (NPV). In particular, considering the current policy of curbing the development of underground water and decreasing level of underground water during a drought, it has been concluded that implementing the desalination process utilizing discarded groundwater is necessary in the mid and long run.



I. 서 론

유네스코와 세계기상기구(WMO)에 따르면 현재 25개 국가들이 물 부족사태를 겪고 있으며, 2025년에는 약 34개 국가로 늘어날 것으로 예상되고 있다. 또한, 물 부족국가들에 살고 있는 인구도 1990년의 1억 3,200만 명에서 2025년 6억 5,300만~9억 400만 명으로 급증하며 2050년에는 10억 6,000만~24억 3,000만 명으로 세계 인구의 13~20%를 차지 할 전망이다(UN-Water, 2014).

우리나라의 경우도 UN 산하기구인 국제인구행동연구소(PAI)의 발표에 따르면 한국의 활용 가능한 수자원량은 630억 m^3 으로서 이를 국민 1인당 활용 가능량으로 환산할 경우, 1955년 2,940 m^3 에서 1990년 1,452 m^3 로 줄어들어 물 부족 국가로 분류되어 있으며, 향후 물 기근 국가군으로 전락할 위기에 놓여 있다(국토해양부 2013).

날로 악화되고 있는 수자원 환경을 고려할 때 수질사고나 엘니뇨에 의한 이상기후 등 비상시에 대비하여 용수원 다변화가 필요하며, 대체수자원 개발에는 지하수 인공함량, 해수담수화, 빗물이용 등이 있다. 특히, 지구의 2/3가 바다인 만큼 대체수원으로써 담수화에 대한 의존도는 더욱 커질 추세이다. 담수화 기술은 역삼투법, 증발법, 전기투석법 및 냉동법 등이 있으며, 에너지 소비가 상대적으로 작고 기술집약에 유리한 역삼투법으로 기술 패러다임이 변화되면서 전 세계적으로 널리 사용되고 있을 뿐만 아니라 이에 대한 연구 또한 활발하게 이루어지고 있다.

제주특별자치도의 용수공급은 대부분이 지하수를 원수로 하여 생활용수, 농업용수 등 거의 모든 용수는 90% 이상을 차지하고 있으며, 지역별로는 강수누적 결핍지속기간동안 지하수 흐름 방향의 역전 현상이 발생하여 지하수로 염분이 유입되는 사례가 간혹 발생하고 있어 사회문제가 되기도 한다. 도서지역의 용수 공급은 본도와 다르게 담수화시설에 의존하고 있으며, 우도를 제외한 추자, 가파 및 마라도에는 1일 1,705 m^3 /일의 역삼투 담수화시설이 운영되고 있다. 추자도의 경우는 표면해수를 원수로 하여 2000년부터 1일 1,500 m^3 을 주민에게 식수로 공급하여 오고 있다.

우도의 경우는 1999년부터 염지하수를 담수화하여 공급하여 왔으나 2010년 종달~우도간 해저관로가 공급되면서 광역상수도가 공급되고 있다.

제주지역의 용수공급 전망은 대규모 개발사업의 다수 추진되고 관광객이 지속적으로 증가하면서 물 수요량이 급격히 증가하고 있음에 따라 하절기에는 지역별로 물 부족 현상이 발생하고 있다. 특히 구 제주시 지역의 경우 동쪽에는 삼화택지개발사업, 화북공업단지 확대, 서쪽으로는 노형지구도시개발사업 등 대규모 개발사업이 추진되면서 물 수요량이 증가하고 있어 추가적인 식수원 개발이 필요한 실정이다. 반면 지하수 개발에 대한 반대여론이 커지고 인근지역에서 안정적인 수원 확보가 어려워지면서 현재는 조천 및 애월 광역정수장에서 공급 받고 있으나 수요량 증가를 충족시키기 위해서는 추가적인 식수원 개발이 필요한 실정이다.

구제주시 동부지역에 용수를 공급하는 도련정수장은 시설용량이 20,000 m³/일으로 삼양 1,2수원 및 3수원에서 원수를 공급하는 것으로 하여 개발되었으나, 삼양 3수원 염소이온농도가 수질기준을 초과하면서 현재는 도련정수장 인근에 5 개공의 지하수를 개발하여 공급하고 있다. 지속적으로 수요량이 증가하면서 최근에는 도련정수장 가동율이 시설용량에 근접하고 있어 최소 1일 8,000 m³ 이상의 추가적인 수원 개발이 필요한 실정이다.

삼양 3수원은 1995년 제주시 삼양동 인근에 용천수를 개발한 취수원으로 염소이온농도가 기준을 초과하면서 예비 수원으로 관리되고 있다. 용천수는 빗물이 지하로 스며든 후에 대수층(帶水層)을 따라 흐르다가 암석이나 지층의 틈새를 통해 지표로 솟아나는 지하수로 인위적인 취수가 아닌 자연 배출되는 것으로 적절한 수량을 활용한다면 해수 역전현상 등 지하수에 영향 없이 지속가능한 수자원 이용이 가능한 수원으로 적절한 활용방안 검토가 필요한 시점에 와 있다.

따라서 본 연구에서는 삼양 3수원의 용천수를 활용하여 담수화 공정을 도입하는 경우 최적의 전처리공정 구성, 수질 예측, 경제성 분석 및 지하수를 개발하는 경우와 경제성 등을 비교 평가하였다.

II. 문헌 고찰

1. 국내·외 물 부족 현황

강수량이 비교적 많은 아시아 몬순지대에 속하는 우리나라의 연평균 강수량은 약 1,283 mm정도이며, 연강수량은 754 mm에서 1,782 mm까지로 변화폭이 매우 크다(환경부 2006).

우리나라의 강수량은 세계평균 973 mm에 비해 1.3배 크지만, 1인당 평균 강수량은 2,705 m³/년으로 세계평균 강수량 22,096 m³/년에 비해 12% 정도로 낮은 수준이다. 국제인구활동(Population Action International, PAI)이라는 단체에서는 1인당 평균 강수량을 바탕으로 우리나라를 물 부족국가(Water Stressed Country)로 분류하고 있다(Yoo, 2004).

물 부족의 주된 원인은 첫째로 세계적인 인구 증가, 두번째는 인류의 삶의 부유해지면서 상업화, 메가시티화, 육류 소비 등에 따른 물 소비 증가, 세번째로는 계속되는 이상 기후로 엘니뇨와 라니냐 등의 지구 환경변화, 환경오염에 의한 수자원 오염 등을 들 수 있다. 물 부족에 대한 경고는 늘 있어 왔으며 최근에는 IWA (International Water Association) 회장이 "과거에는 물 부족 현상이 지역적인 문제였지만 앞으로 10년 정도 뒤면 물 부족은 세계 문제가 될 것"이라면 강력하게 경고한 바 있다(Glen Daigger, 2011).

국내의 경우 2011년의 물 부족지역 전망에 따르면 경기북서부권, 수도권, 서해안 지역, 경남북의 동해안 및 경남 남해안지역의 물부족이 가장 클 것으로 전망되며 또한, 낙동강 권역의 경남북, 영산강 및 섬진강 권역의 전북 남부권 및 동부권, 전남 남동부권, 금강권역의 대전권, 충남과 충북의 중부권 등에서 물 부족을 전망했다.

또한, 2011년 물 수요기준 부족지역의 용수 부족율은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 경

기북서부권, 삽교서해안, 충북남부권, 경북중서부권, 낙동강 동해안, 경남·북 동부권, 동진강 및 영산강 서해안, 전북 남부권의 물 부족 비율은 -20~-40% 전망되며 충북북부권, 경남북부권, 경남남동부권, 낙동강 남해안의 물부족 비율은 -10~-20%로 전망된다(국토교통부, 2011).

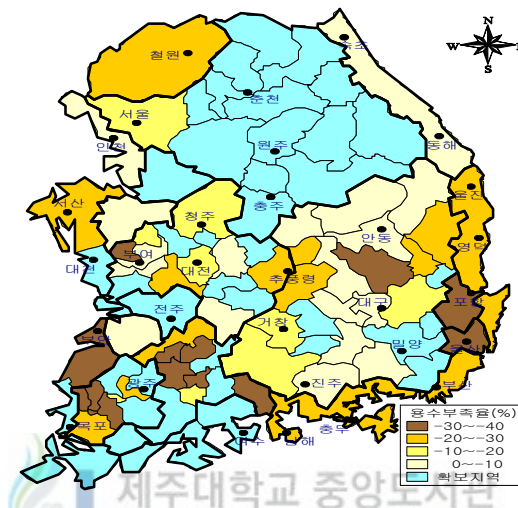


Fig. 1. The groundwater shortage rate of the areas that suffer from water shortage

2. 제주도 용수공급 현황

2013년 말 현재 제주특별자치도의 총 상수도 시설용량은 153 개소에 452,825 m³/일이고, 1일 급수량은 225,655 m³에 이른다. 취수원은 33 개소에 370,400 m³/일로 수원별로 분류하면 지하수 33 개소(광역 1단계 14 개, 2단계 9 개소)에 223,000 m³/일, 용천수 10 개소(어승생 1, 제주시 6, 서귀포시 3)에 147,400 m³/일 이다. 총급수인구는 604,670 명이며, 상수도 보급률은 100 %로 전국 상수도 보급율은 98.1 % 보다 높다. 1인당 1일 급수량은 359 L로 전국 평균 급수량 332 L 보다 높은 실정이다.

상수도 시설용량은 도 전체적으로 보면 충분한 편이지만 상수원이 마을 단위로

분산되어 있을 뿐만 아니라, 유수율 저하, 용수공급 체계도 연계성이 미흡하여 갈수기 및 여름철 물 사용량이 많은 최대용수 수요기에는 일부지역에서 물 부족 현상이 발생하는 사례도 생겨나고 있는 실정이다.

이와 같은 상수도 공급체계의 문제점을 해결하고 용수공급의 안전성을 도모하기 위해서 1995년부터 2013년까지 광역상수도건설사업을 추진하여 왔으며, 특히 중산지역 개발에 따른 수요량을 충족시키고, 지역별로 보다 안정적인 공급을 위하여 광역상수도 III단계 시설사업으로 어승생 2저수지건설사업을 2007년부터 2013년까지 추진하여 상수를 공급하고 있다. 또한, 유수율 향상을 위하여 관망블럭화사업 등을 지속적으로 추진하고 있으며, 현재의 수요량을 충족시키기 위해서는 일정기간 동안은 개발량 확대가 필요할 전망이다(수자원본부, 2014.).

3. 삼양 3수원지 특성

삼양 3수원지는 제주도 동부지역의 안정적인 물공급을 위하여 바닷가의 용천수를 개발한 것으로 Table 1에 나타난 바와 같이 제주도 도련동에 위치한 도련정수장의 원수로 활용하여 제주도 삼양동을 비롯한 주변 지역에 장기적인 상수도 공급원으로 활용하고자 계획하였다. 사업추진은 총사업비 143 억원을 투입해 1992년부터 1995년까지 추진하였으며 시설용량은 하루 2만 m³으로 염소이온농도 수질기준 초과로 예비 시설로 관리되어지고 있다.

Table 1. The current status of the facilities in Samyang 3 catchment area

구분	현황	비고
위치	제주도 삼양1동1912-번지	
시설용량	20,000 m ³ /일	도련정수장 공급
시설년도	1995년 12월	
급수구역	일도1, 2동	
양수펌프	350 HP 3대	

하지만 삼양 3수원의 용천수는 개발 이후 원수의 염소이온농도가 먹는물 수질기준치인 150 mg/L를 훨씬 초과하였고 원인을 규명하기 위하여 수리지질학적으로 연구를 수행하였으며 그 원인은 매우 복잡한 자연 및 인위적인 현상에 의해 발생한 것으로 밝혀졌다. 1996년의 경우는 1~9월 동안 내린 강수량은 그 이전 36년간 제주시에서 발생한 연평균 강수량의 41.7 %에 해당하는 극심한 한발기로서 이러한 강수량의 감소는 결국 용천 유출량의 감소와 용천수위 강하의 원인이 되었다. 이로 인해 만조시 매 주기별로 2~3.8 시간 동안 해수면이 수원지내 지하수위보다 4.4~12.4 cm 높게되어 기존 차수벽 하부의 투수대 구간을 통해 해수가 역동수구배를 따라 수원지내 유입되어 지하수의 염소이온농도 증가원인이 되었다. 삼양 3수원지 주변 용천에서 염소이온농도는 150 mg/L 이하로 유출되는 순수지하수 유출지속 시간은 하루 약 2시간 정도였으며 유출량은 532 m³/일 이었고 만조시 염소이온 농도는 1,900 mg/L 이상으로 조사되었다(연세대학교, 1997).

또한, 지질적인 원인을 파악하기 위하여 수직 레미콘으로 타설한 수직 콘크리트 벽체와 그라우팅을 실시한 구간과 지하지질 상태를 파악하기 위하여 1996년 6월 7일에서 29일 사이에 시험시추공 총 8개소를 수원지내에 설치하였다. 수원지 일대의 관측공의 지표하 20 m 구간까지 굴착한 구간내에는 대체적으로 2매이상의 스코리아 층과 최소 2내지 6조의 파쇄대가 발달된 투수성이 양호한 현무암으로 구성되어 있다. 특히 시험시추시 누수현상이 현저히 발생한 구간들이 그라우팅 하부구간도 상당히 넓게 분포되어 있었다. 이와 같은 사실은 제주도내에 분포된 현무암류의 수리지질 특성을 감안할 때, 이러한 투수성 지층 및 구간은 비단 금번에 굴착한 지표하 20 m 구간이내에는 물론 20 m 하부구간에도 널리 분포되어 있는 것으로 추정하였다(연세대학교, 2007).

삼양 3수원을 활용할 수 있는 방법은 2가지를 들 수 있는데, 첫째는 도련정수장의 원수로 활용하는 방안으로 수원지 외곽에 추가로 차수막 보강공사, 두 번째는 염소이온을 제거하여 용수로 공급하는 방안을 들 수 있다. 전자의 경우는 투수성이 높은 기존 암반의 특성 때문에 신뢰성이 낮은 반면 담수화시설을 도입하여 처리후 이용하는

방안은 확실성이 높아 수도정비기본계획 등에 반영후 점진적으로 추진하는 것이 지하수 보존뿐만 아니라 용천수의 효율적인 방안이라도 판단된다.

4. 담수화 기술

4.1. 담수화 기술의 정의

담수화란 염분을 포함한 다량의 이온성분을 포함하고 있는 바닷물로부터 음용수 및 생활용수 등으로 사용할 수 있도록 이온성분을 제거하여 담수를 만드는 기술을 말한다(Lee, 2002; Kim, 2009). 해수는 일반적인 구성성분에 있어서는 전 세계가 거의 차이점이 없는 것으로 알려지며, 다만 농도에 있어 각 지역별 환경조건에 영향을 받아 차이가 나타나는 것으로 알려진다. 해수의 일반적인 구성성분은 아래의 Table 2에 나타내었다.

담수화 초기에는 가장 간단한 방식으로 증발응축을 이용하여 순수 물분자를 얻는 증발방식으로부터 시작되었다고 볼 수 있으나, 현재에는 역삼투막을 이용하는 방식등 다양한 기술들이 개발되어 현실화 되어 있다. 해수담수화 공정 적용이 가장 활발한 곳은 중동지역 및 이스라엘 지역으로 초기 증발식 공정에서부터 현재 막여과 방식을 비롯하여 두가지 방식을 혼합한 하이브리드 방식까지 다양하게 적용되어 있다. 증발응축의 초창기 방식은 Fig. 2과 같이 일반적으로 열원을 이용하여 물을 증발시킨 후 다시 냉각시켜 순수에 가까운 물을 만드는 방식으로 증발식이라고 불리우며, 가장 대표적인 기술로 다단플래쉬법이 있다. 이에 비해 막여과 방식은 막을 이용하여 확산 및 체거름 현상을 이용하는 방식으로 Fig. 3와 같이 자연적인 삼투 현상을 역으로 이용하는 역삼투막 방식이 대표적이다. 특히, 20세기 후반부터는 에너지 소비가 낮은 역삼투막이 증발식 해수담수화 공정을 추월하는 추세에 있다.

해수담수화기술이 장점은 짧은 공사기간으로 댐 다음으로 다량의 수자원을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 계절과 기상조건에 좌우되지 않고 물의 확보가 가능하다는 특징을 가

지고 있다.

담수화의 역사는 물을 끓이면 증발하는 방식으로 수세기 전부터 시작되었으나, 최초의 상업화 프로젝트 중에서 가장 대표적이고 큰 프로젝트라고 할 수 있는 것은 1912년 이집트에 설치된 증발식 중 하나인 다중효용방식으로 건설된 해수담수화 공정을 들 수 있다. 그러나 그 이후로 이러한 해수담수화 공정에 의해 생산된 물은 생산비용 면에서 경제성이 없으므로 인하여 특수한 목적에 의해서만 소규모로 설치·운영되었다. 이러한 해수담수화 공정은 중동지역의 특수한 상황(에너지비용 저렴·담수원 전무)으로 인하여 1970년 이후로 크게 발전하였는데, 이들 지역 내에서 증발법을 중심으로 발전하였다(IDA, 2003).

Table 2. The components of sea water

구성성분	TDS 35,000 mg/L일 때 일반적인 구성성분 (mg/L)	비 고
Na ⁺	10,500	
K ⁺	380	
Ca ²⁺	400	
Mg ²⁺	1,350	
Cl ⁻	19,000	
SO ₄ ²⁻	2,700	
HCO ₃ ⁻	142	
CO ₃ ²⁻	3.5	
Br ⁻	65	
B	4.5	
TDS	35,000	
pH	7.5 - 8.5	
DOC	0.5	

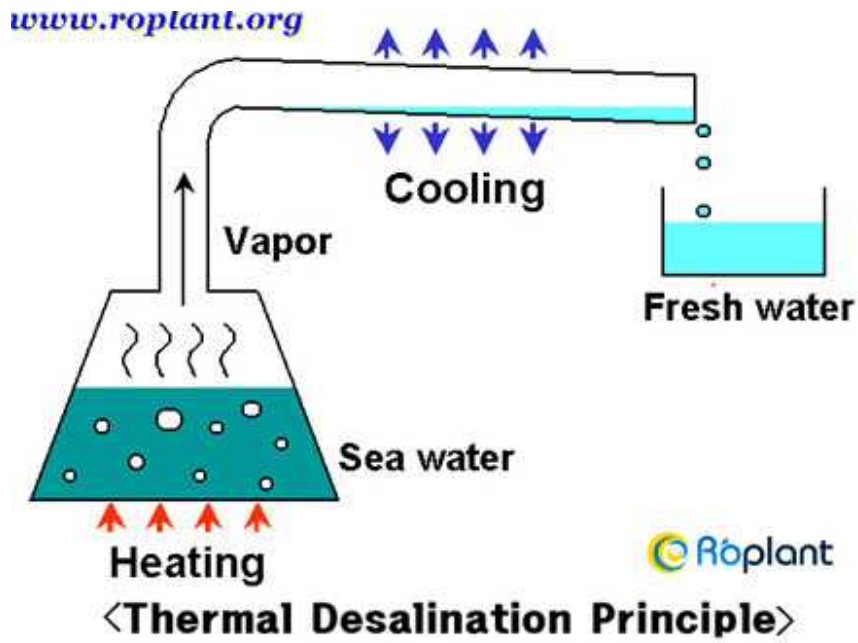


Fig. 2. The principles of the evaporation method

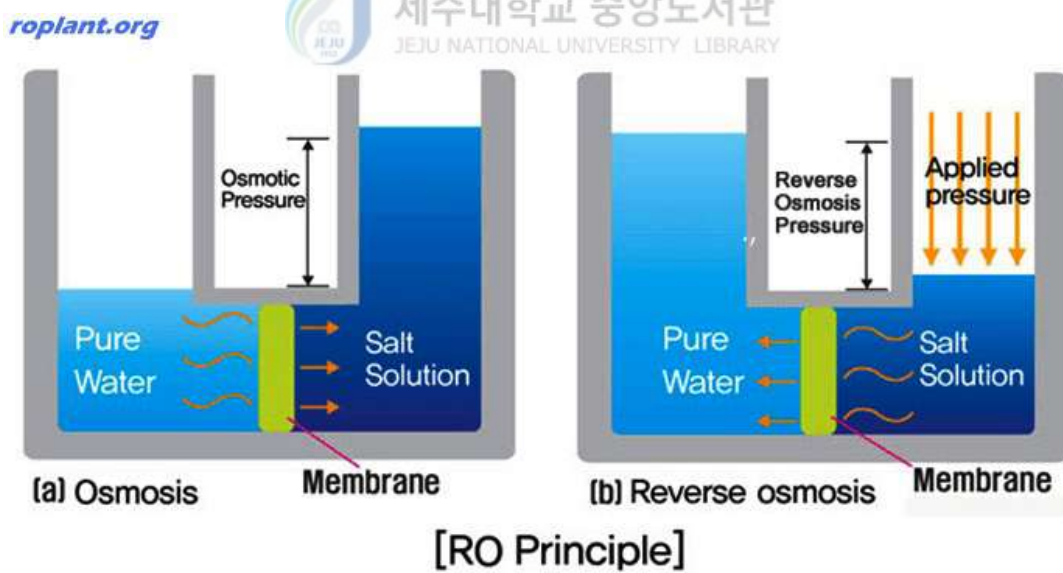


Fig. 3. The principles of the reverse osmosis method

4.2. 염분농도에 따른 염수의 분류(TDS기준)

염분 농도에 따라 물을 분류하면 TDS가 약 10,000~50,000 mg/L 일 때를 해수(Sea Water), 약 1,000 ~10,000 mg/L 이하 일 때를 기수(Brackish Water), 약 300 mg/L 전후일 때를 담수(Fresh Water)라고 한다. 또한 염수는 해수와 기수를 합쳐서 부르는 용어이다(김충환, 2000).

일반적인 표준 해수의 TDS의 경우는 약 35,000 mg/L 정도이며, 기수의 경우는 바닷물과 담수가 섞여 있어 소금의 양이 바닷물 보다 적은 물을 말한다. 기수가 흐르는 지역을 기수역이라 하는데 보통 강의 하구 또는 해안가에서 부터 2~3 km 정도의 범위에 존재하며, 염수에 대응하는 말로써 염의 함유량이 적은 보통의 육지에 존재하는 물을 말하며 약간의 염분이 있어서 순수한 물과는 다르며, 명확하게 구별 짓기는 어렵다. 다만 낮은 염분농도의 원수를 취수하는 것은 전체적인 원가에 미치는 영향이 크므로 중소규모의 해수담수화시설의 경우 취수시설을 도입함에 있어 매우 중요하다.

취수 설비는 태풍, 해조류 및 부식 등에 안정적이어야 하고 일정하게 깨끗한 원수를 취수하는 것이 중요하다. 또한 취수 목적이나 지리적 여건, 경제성, 플랜트 용량에 따라 다양한 취수 방법이 있으며 취수구에 스크린 등을 설치하여 대형 협잡물을 제거하고 해조류의 부착을 예방하기 위해 염소약품을 주입하는 등의 과정을 거친 뒤 취수하게 된다. 일반적으로 Sub-Surface 방식을 이용한 취수 방법이 전처리 부하를 줄이고 멤브레인 내구성을 확보할 수 있으나 경제성이 떨어져 대용량 플랜트의 경우는 Surface Intake 방식을 사용하게 된다(AWWA filtration research, 1980). 이때는 수질 변화, 부유물질 유입 등이 비교적 쉽게 일어날 수 있으므로 세밀한 설계가 필요하다(Mitrouli, 2008, Isaias, 2001).

4.3. 담수화 공법의 종류

해수담수화 방식에는 물의 증발현상을 이용하는 증발법, 막의 차별성과 선택적 통과능력 이용하는 막여과법 및 동결법과 같은 부차적 탈염 공정이 있다.

증발법은 상변화에 의존하는 방법으로 해수에 열을 가하여 담수를 위한 수증기와 농축수를 만드는 방식으로. 가장 공통적으로 적용되는 방식은 다단플래쉬법(MSF, Multiple Stage Flash Distillation), 다중효용방식(MED, Multiple Effect Distillation), 증기압축법(VCD, Vapor Compression Distillation) 등이 있다.

반면에 막여과 방식은 역삼투법(RO, Reverse Osmosis), 전기투석법(ED, Electro Dialysis), 정삼투법(FO; Forward Osmosis)을 대변하나 일부 나노막을 이용한 경우도 있다. 역삼투 방식은 용질(이온성 물질)은 거의 투과시키지 않는 반투과성 막(RO막, Reverse Osmosis Membrane)에 해수를 가압하여 담수만을 분리해내는 공법이다.

막여과 방식은 에너지 비용면에서 유리하여 현재 가장 빠르게 성장하고 있는 공법으로 Table 3과 같이 공법 점유율이 32% 정도로 급격하게 성장하고 있다. 정삼투법은 막을 사이에 두고 고농도의 유도용질을 해수와 접하게 하여 해수중의 담수를 유도용질로 흡수시킨 후 유도 용질에서 담수를 분리시키는 방식으로 담수를 생산한다. 전기투석법은 이온교환막(Ion exchange membrane)을 이용하기 때문에 막여과 방식에 포함될 수 있으나, 전기투석법과 역삼투막의 가장 큰 차이점은 운전을 위한 소스(전기적인 힘과 압력)의 차이이다(Park, 2012).

Table 3. The current conditions of desalination plants by country

국가	총 용량 (m ³ /일)	다단플래쉬 (%)	다중효용 (%)	증기압축 (%)	역삼투 (%)	전기투석 (%)
사우디아라비아	5,429,334	64.22	0.329	1.39	32.254	1.8
아랍	2,890,689	86.66	7.7	0.03	5.51	0.09
쿠웨이트	1,614,861	96.52	0.08	0	3.25	0.15
카타르	572,870	94.34	3.86	0	1.8	0
바레인	473,391	62.74	9.67	0	26.88	0.71
오만	377,879	87.31	1.11	3.7	7.63	0.237

2.3.1. 다단플래쉬법(MSF)

다단플래쉬법(MSF)은 현재 대용량 담수화장치에 가장 널리 사용되는 담수화기술로 전세계 담수화 용량의 약 60% 정도를 차지하고 있다. 기본원리는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 점차 진공도가 높은 격실을 두고 고압의 열교환기 내에서 가열된 해수가 오리피스를 통해 저압의 격실로 분출되면서 증발, 이때 전체의 열에너지는 동일한 상태로 각 격실에서 외부로부터의 열공급이 없으므로 원수의 잉여 에너지에 해당하는 부분만의 잠열로 변환되기 때문에 각격실에서의 증발량은 수% 이내이다. 증발은 어떤 온도의 액체를 그 온도에 대응하는 포화증기압 이하로 급감압하면 액체는 유지하고 있던 열을 증발잠열로 소비하게 되어 자기증발을 유도하는 방식이다.

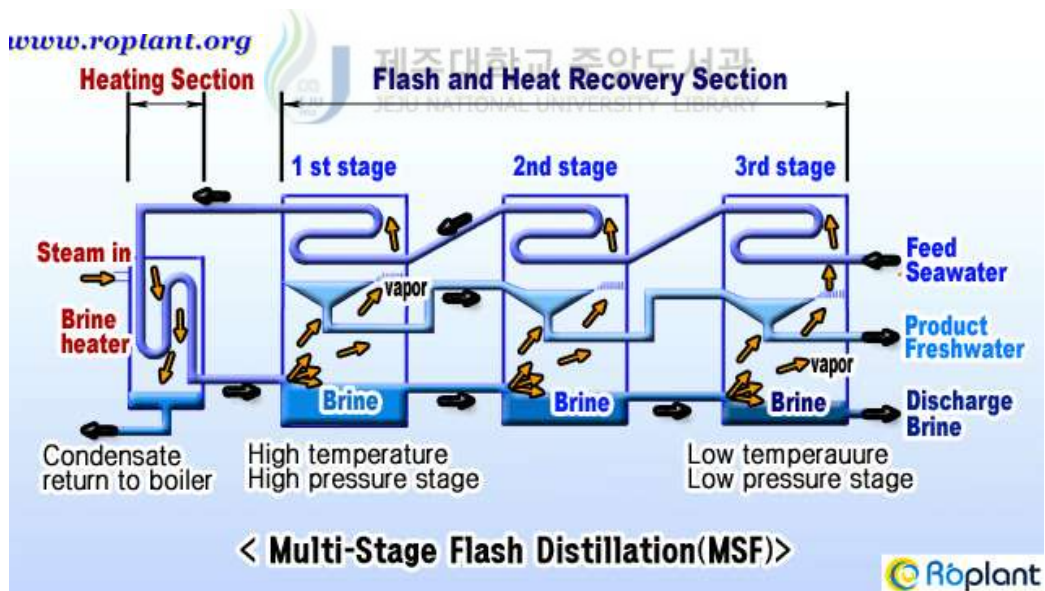


Fig. 4. Multi-stage flash distillation (MSF)

다단플래쉬 방식의 기본적인 원리는 액체의 끓는점을 낮추기 위하여 임의의 온도에 대응하는 포화증기압 이하로 감압하는 것이다. 이러한 원리는 다단플래쉬 방식과 다중효용방식이 같지만 다중효용방식은 증발관내(또는 외부)에서 증발이 일어나는데 비해 다단플래쉬방식은 상대적으로 고압의 열 교환기를 통해 가열된 해수가 오리피스를 통해 저압의 격실로 분출되면서 증발되는 것이다(Helal, 2003).

따라서 이러한 원리에 의해 여러 개의 단을 통하여 각각 다른 끓는점을 이용할 수 있는 것이다. 아래 Fig. 5은 각각의 압력에 따른 끓는점의 변화를 나타낸 것이다. 최초 각 압력에서 끓는점까지 해수의 온도를 증가 시키는데 소요되는 열량을 일반적으로 각 발전플랜트에서 공급되는 고온의 증기로부터 얻게 된다.

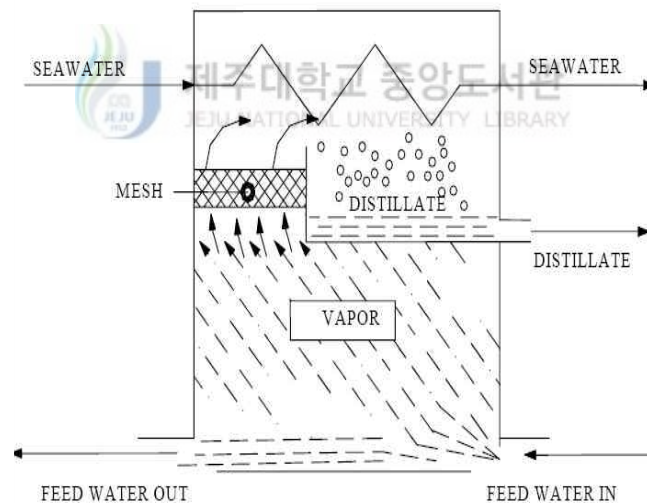


Fig. 5. The operation of the multi-stage flash seawater desalination process

2.3.2. 다중효용방식(MED)

다중효용방식(MED)은 단순 증류기를 시리즈로 배열한 형태로 Fig. 6와 같이 첫 번째 증발기 보일러에서 발생된 증기가 다음 효용증발기의 가열원으로 작용하고 냉각 응축되어 담수가 되고, 두 번째 증발기에서 발생된 증기는 다음 효용의 증발기에서 가열원으로 작용하여 증발기 내부의 해수를 증발시키는 원리이다. 즉, 전단에서 받은 증기가 다음단이 열원이 됨과 동시에 이 증기는 냉각 응축되어 담수가 되고, 이때 재차 증발된 증기는 다음 단에서 동일하게 작용한다

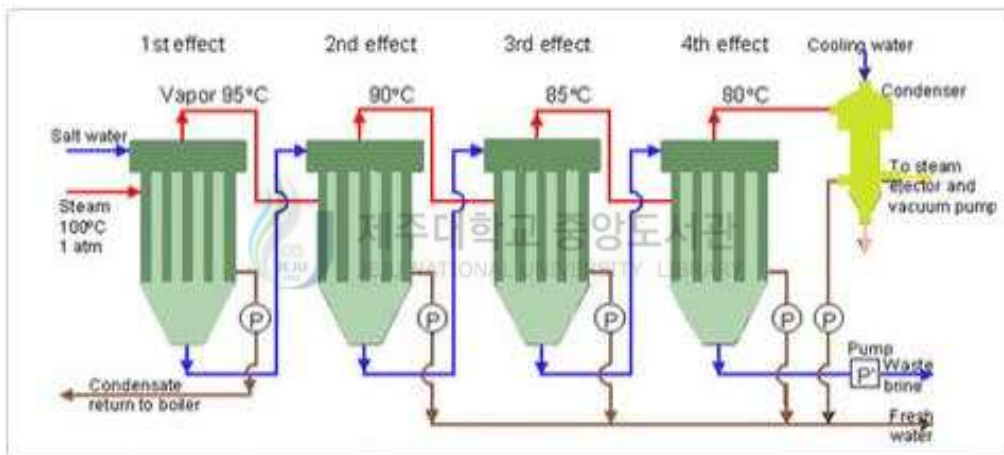


Fig. 6. Multi-effect distillation (MED)

다중효용법은 다단플래쉬법과 유사한 점이 많다. 이 두 공정은 증발 및 응결의 원리는 동일하나 주된 차이점은 증발의 방식과 열전달 프로세스로 즉 다중효용방식은 뜨거운 열 교환기에 접촉한 바닷물이 증발하는 것이고, 다단플래쉬 방식은 관내에서 뜨겁게 끓인 바닷물이 농축되어가는 과정에서 발생된 증기를 응결하는 것이다. 따라서 다중효용방식은 농축수가 직접적으로 열교환기에 계속 접촉함으로 인하여 스케일 발생문제가 더욱 심각한 것으로 알려졌다. 이러한 단점으로 인하여 1959

년 이후로 해수담수화 공정에서 다단플래쉬공정에 비해 건설빈도가 적은 것으로 알려지나, 최근 사우디아라비아의 알 주베일에서 비올리아에 의해 800,000 m³/일의 다중효용방식에 의한 해수담수화 공정이 건설됨으로 인하여 새롭게 주목받고 있는 것으로 알려진다.

2.3.3. 증기압축방식(VC)

증기압축법은 소형플랜트에 적합한 증발방식의 한가지로 Fig. 7와 같이 증발조에서 발생한 증기를 압축기에 넣은 후 단열압축에 의해 온도를 상승시켜 이것을 같은 조내에 있는 액체의 가열용 증기로 공급하여 담수를 얻는 방법을 말한다. 증발조에서 발생한 증기를 압축기로 압축시키면 온도와 압력이 상승하게 되는데 이를 증발기의 고열원으로 사용하는 원리이다. 따라서 이러한 점이 다단플래쉬 방식과 다중효용방식과의 차이점이라 할 수 있다.

증기압축법은 3가지의 중요 증발식 중에서 가장 높은 회수율을 나타낼 수 있으며, 약 50%의 회수율까지도 가능한 것으로 알려진다. 그러나 이러한 증기압축법은 건설비 등이 높아 소용량에서 특수한 목적으로만 건설되었으며, 그 플랜트 수도 많지 않다. Table 4은 현재 보고된 가장 큰 5개의 증기압축방식에 의한 해수담수화 시설의 국가별 현황을 나타낸 것이다. 비교적 최근에 건설된 것으로 최대 2400 m³/일 까지 보고되었으며, 이 플랜트 중에서 생활용수로서 사용된 것은 없는 것으로 알려진다. 증기압축방식은 주로 기계적인 방식(Mechanical VC, MVC)과 스팀 방식(Thermal VC, TVC) 등이 있으나 주로 기계적인 방식이 사용된다(Table 4 참조).

Table 4. The current conditions of VC by country

국가	목적	용량 (m ³ /일)	원수	사용처	건설년도
Spain	Desalination Plant	1500	Seawater	Industrial (captive)	2005
Spain	Desalination Plant	768	Seawater	Power	2008
Mexico	Power/Desal Plant	360	Seawater	Power	2007
Chile	Desalination Plant	1920	Seawater	Power	2008
Chile	Desalination Plant	2400	Seawater		

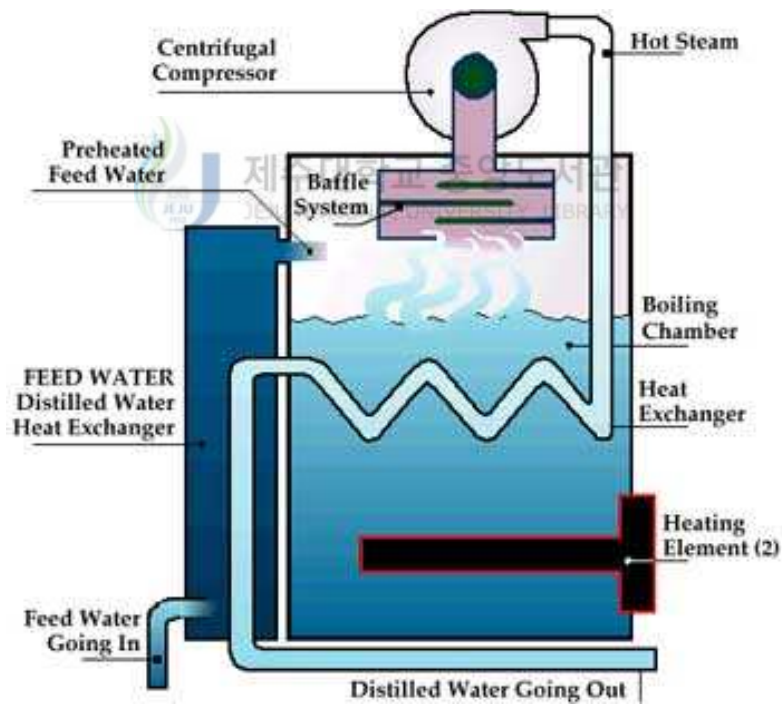


Fig. 7. The forms and structures of the vapor compression method

2.3.4. 증발방식의 비교

증발 방식을 공중별로 특별을 비교하여 보면 운전온도, 에너지요구량, 적용원수는 아래의 Table 5와 같이 조사되었으며, 스팀 압력과 운전효율 및 초기투자비 면에서 MSF에 비해 MED가 훨씬 높으며, MED+VC의 경우가 MSF에 비해 훨씬 낮게 보고되고 있다.

Table 5. The comparison on characteristics of the evaporation methods

항목	다단플래쉬법	다중효용법	다중효용법 + 증기압축	증기압축법
전형적인 운전온도 (°C)	< 120	< 70	< 70	< 70 ⁽¹⁾
에너지 소스	스팀 (열)	스팀 (열)	스팀 (열)	기계적 (전기)
열에너지 요구량 ⁽²⁾ (kWh/m ³)	12	6 ⁽³⁾	21 ⁽³⁾	-
기계적에너지 요구량 (kWh/m ³)	3.5	1.5	1.5	8 - 14
적용원수 농도 (ppm TDS)	30,000 - 100,000	30,000 - 100,000	30,000 - 100,000	30,000 - 50,000
생산수 농도 (ppm TDS)	< 10	< 10	< 10	< 10
1기당 생산능력	5,000 - 70,000	500 - 12,000	100 - 25,000	10 - 2,500

주 1. 예외적으로 100 °C에서 운전하는 경우도 있음 (이 경우 스케일 방지를 위해 산처리필수)

2. 모든 공정에 운전효율 8 kg water/kg steam를 적용 / MSF는 inlet 스팀 압력 1.7 Bar, MED는 0.4 Bar, MED-TVC는 10 Bar를 적용

3. Wangnick, IDA, 2004 참조

2.3.5. 역삼투막 방식(Reverse Osmosis)

(1) 역삼투막 방식의 원리

삼투막(Semi-permeable membrane)을 사이에 두고 Fig. 8와 같이 저농도의 용액이 고농도의 용액으로 흐르는 현상을 삼투현상(혹은 정삼투 : Forward osmosis)이라 하며, 이때 평형현상이 발생할때의 압력을 삼투압($\Delta\pi$)이라고 한다. 역삼투는 삼투압보다 더 많은 압력을 고농도 용액쪽에 가할 경우 고농도의 용액에서의 물이 저농도 쪽으로 흘러가는 현상을 가리키는 것으로 이때 요구되는 압력이 역삼투압(ΔP)이라고 한다.

역삼투막 공정은 역삼투 원리를 이용한 공정으로 해수 염농도에 비례하는 삼투압 이상의 역삼투압을 가하여 원수중의 일부를 순수한 물로 생산하며, 나머지 농축수는 바다로 다시 보내는 공정을 말한다(Fritzmann. et al., 2007; Teuler. et al., 1999). 따라서 이러한 역삼투막 공정에서 가장 중요한 것은 역삼투막 (Reverse Osmosis Membrane)이라고 할 수 있다. 삼투막을 역삼투 공정에 최적화 시킨 것을 역삼투막 이라고 하지만 사실 두 개의 용어는 같은 것이다(Ebrahim. et al., 1995).

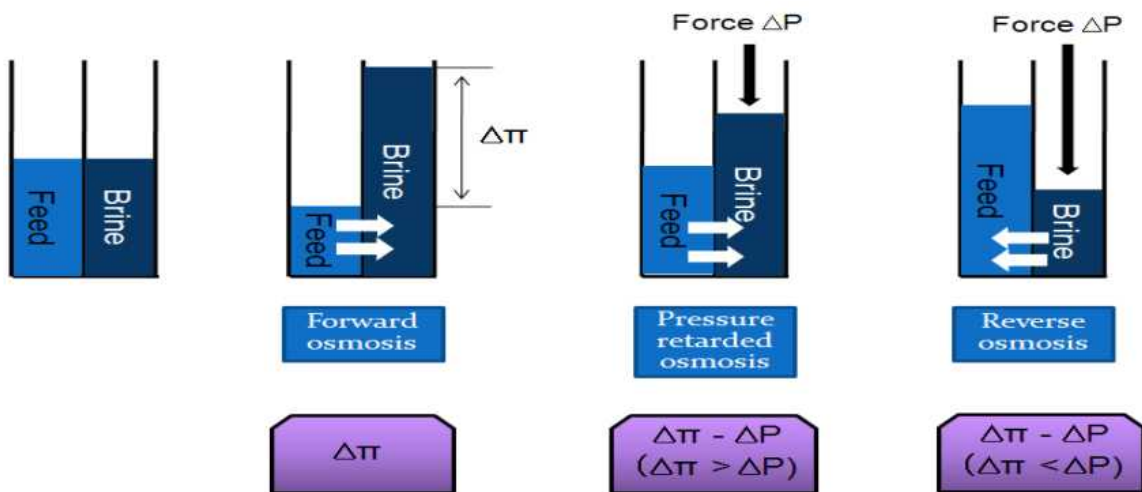


Fig 8. The principles of osmosis and reverse osmosis

(2) 역삼투막의 구조 및 재질

역삼투막은 1953년 Reid 교수에 의해 발표되었고, 산업에 처음 적용된 것은 1960년 Loeb와 Sourirajan에 의해 개발된 Cellulose Acetate Membrane이며 (Bowen W. R., 1995), Fig. 9, 10과 같이 지지층 위에 매우 얇은 분리 기능성 구조를 가지는 표면을 가진다. 두 층은 Cellulose Acetate와 같은 고분자 소재가 같은 재질로 사용되며, Nonsolvent-induced Phase Separation 방법에 의해 제조된다. 지지층은 활성층이 고압에서도 견딜 수 있도록 지지하는 역할을 하며, 조밀한 구조의 활성층만이 염 제거 작용에 영향을 준다. 염의 분리 작용을 하는 활성층의 두께는 전체의 1/1000 정도로 얇은데, 이것은 물의 투과에 대한 저항을 감소시켜 물의 막 투과 유속을 증가시키기 위함이다. 그리고 활성층을 이용하여 고압으로 염을 제거하게 되면 압력이 증가함에 따라 막투과 염 제거율은 상승하게 된다. 역삼투압 기술은 1964년 이후 상업적으로 활용되었고, 비대칭 Cellulose Acetate Membrane은 1960 ~ 1980년에 걸쳐 산업공정에서 순수 제조와 반도체 산업에서의 초순수 제조에 주로 사용되어 왔다.

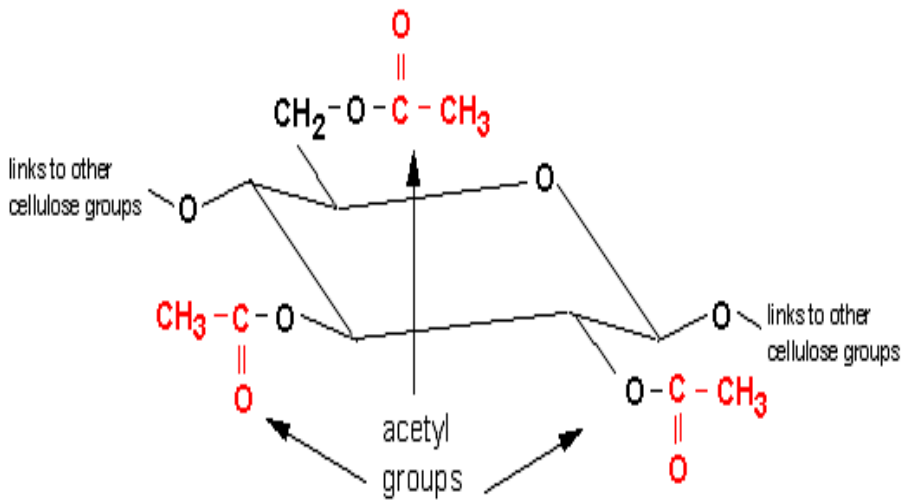


Fig. 9. The membrane structure of cellulose acetate material

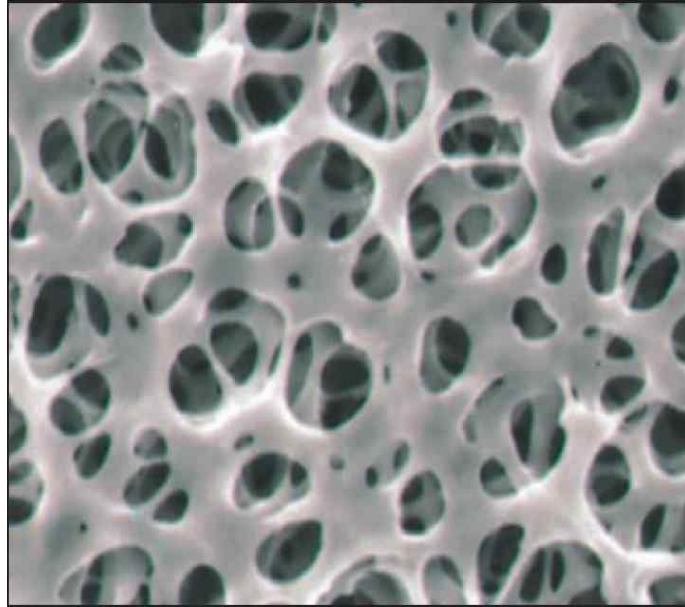


Fig. 10. The enlarged photos of cellulose acetate material



앞에서 설명한 비대칭 cellulose계 막은 cellulose의 개질 혹은 여러 cellulose의 조합을 통해 사용되었지만 운전 가능한 pH 범위가 좁다는 점과 높은 압력을 사용하므로 운전비용이 많이 든다는 점, 미생물 방지를 위해 염소를 투입해야 하는 등 여러 단점이 있어 현재는 거의 사용되지 않는 추세이다. 반면 Fig. 11, 12와 같은 polyamide계 막의 복합막은 비대칭 cellulose계 막과 비교하여 pH 변화에 대해 안정성이 높고 낮은 압력에도 구동이 가능하며, 비대칭막에 비해 막의 표면적이 넓어서 단위 압력 대비 투과 유량이 많으며 염 제거율이 뛰어난 특성을 가져 현재까지 널리 활용되고 있다(Harrelkas. et al., 2009). Polyamide 뿐 아니라 polyurethane계, aromatic polysulfone계 등을 대상으로도 연구가 활발히 진행되어 왔다. 비대칭 역삼투막과는 달리 복합막은 기능성 구조를 가지며 분리기능을 담당하는 활성층과 지지층이 기본적으로 다른 물질로 되어 있다 1970년 이후 고기능성 역삼투막을 개발하기 위해 복합막 제조를 위한 많은 방법들이 제안되었다.

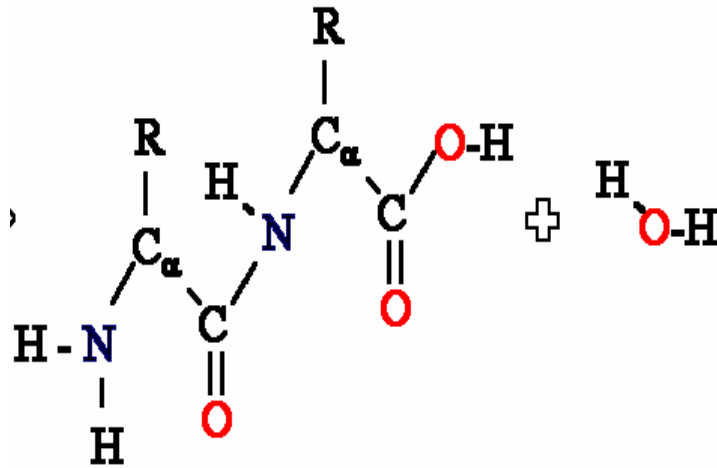


Fig. 11. The membrane structure of polyamide material.

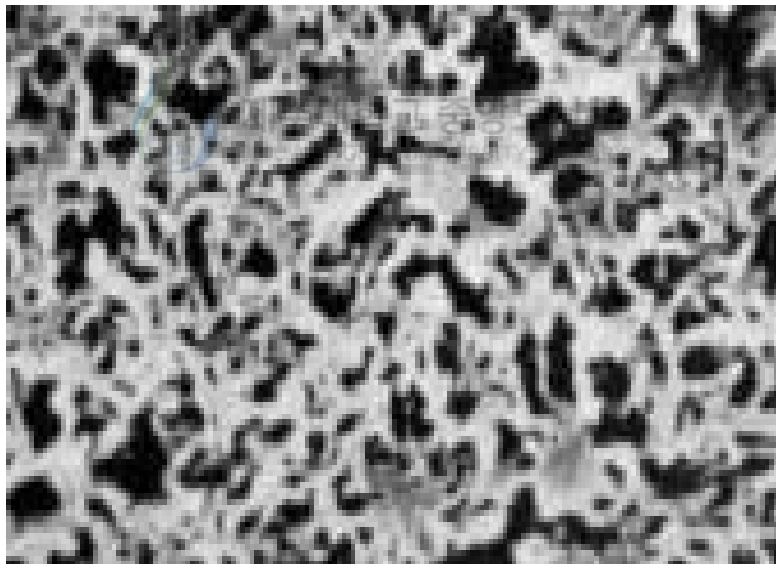


Fig. 12. The enlarged photos of polyamide material

역삼투막은 제조된 막 형태로 사용할 수 없기 때문에 현장적용이 가능한 형태로 제조가되며, 이러한 것을 모듈이라고 부르며, 크게 와권형(Spiral Wound), 중공사형

(Hollow fiber), 튜브형(Tubular), 평막형(plate)으로 나누어질 수 있다. 또한, 막의 각각의 형태는 유효면적을 넓히기 위해 최적의 방안으로 설계되었으며, 담수화 공정에서는 고압 및 높은 투과수량을 Fig. 13과 같은 와권형이 주로 사용 된다(Blatt, 1970).

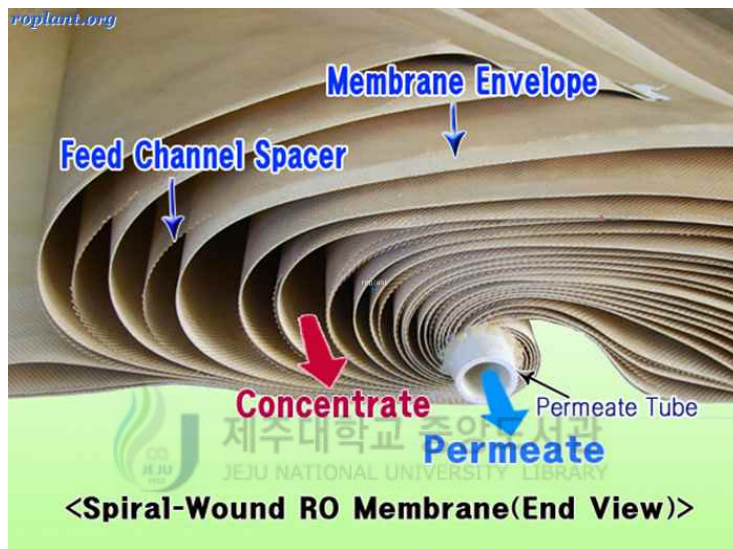


Fig. 13. Spiral type module

(3) 역삼투막 공정의 에너지 소비

역삼투막 공정의 경우 에너지 요구량은 원수의 염농도에 직접적으로 비례하며, 현재까지 상용화된 해수담수화 공정에서 가장 에너지비용이 경제적인 것으로 알려졌다. 이것은 순수한 물을 생산하는데 필요한 에너지 소비는 삼투압과 관계가 있기 때문이며 따라서 주된 에너지 소비는 삼투압 이상으로 가압하기 위한 펌프들에서 발생하는 전력으로 약 역삼투막 공정에 있어 80% 정도를 차지하는 것으로 알려졌다. 현재는 이러한 펌프에서 발생하여 소모되는 압력을 회수할 수 있는 에너지 회수장

치가 적용되어 4 kWh/m³ 전후까지 에너지 소모량을 감소시킨 것으로 알려지며, 점차 대형화되고 있는 추세이다(Elguera, 2005).

최근에는 담수화 기술 개발이 진행되며 멤브레인 재질 및 에너지 회수장치에 대한 기술적 개선이 이루어져 담수화에 의한 생산원가가 낮아지고 있으며 담수화 외에 다른 대안이 없는 지역에서는 담수화 기술 사용이 가장 안전한 해결방안이 되고 있다. 부산광역시 기장군의 경우는 1일 총사업비 1954억 원의 예산을 투입해 2009년부터 올해 11월까지 추진한 4.5만 톤 규모의 고효율 저에너지 해수담수화플랜트를 중공하고 운영을 준비 중에 있다. 또한 캘리포니아주의 경우는 Fig. 14와 같이 19만 m³/일의 음용수를 제조하는 대용량의 칼스배드(Carlsbad) 담수화 플랜트를 계획 중이며 2016년에 상업운전 예정이다.

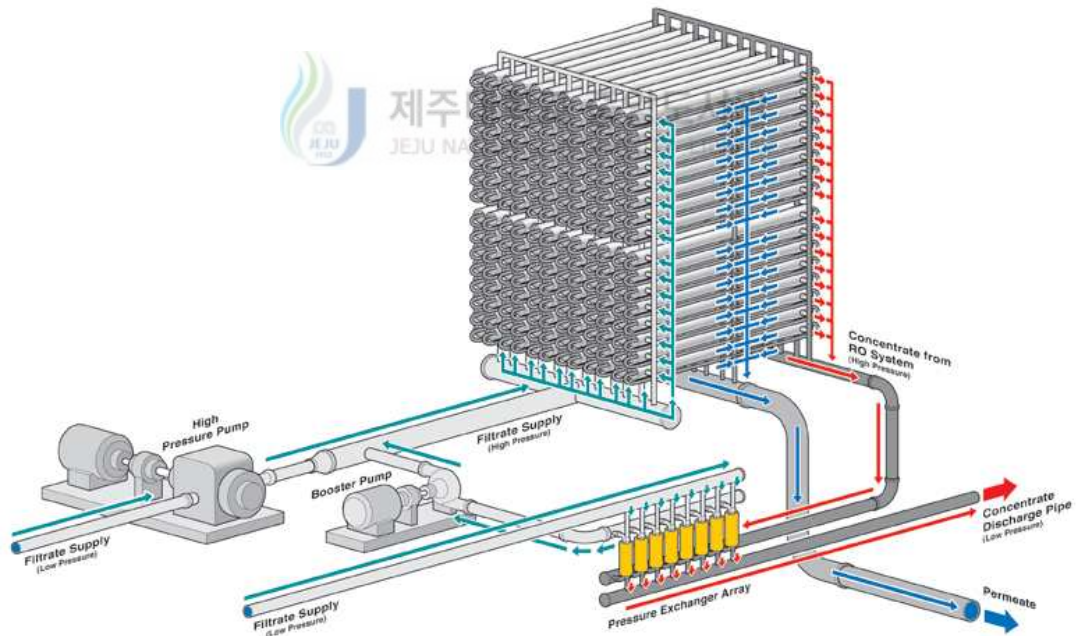


Fig. 14. Carlsbed RO plant(<http://eponline.com> 참조).

2.3.6. 전기투석 방식

전기투석법이란 반응조 양단에 위치한 전극을 통하여 전력을 공급하면 물속에 존재하는 이온성물질이 이온교환막을 통하여 선택적으로 분리되는 공정이다. 따라서 역삼투막 공정과는 구동력면에서 각각 전기적인 힘과 압력으로 확연하게 구별될 수 있다. 일반적인 원리는 양극과 음극 사이에 양이온 교환막과 음이온 교환막을 배치하여 직류전원을 가할 경우 각 이온들이 투과 가능한 막으로 이동을 하며, 한쪽에서는 순수한 물과 한쪽에서는 농축된 물이 생산되는 것으로 아래의 Fig. 15에 잘 나타나 있다.

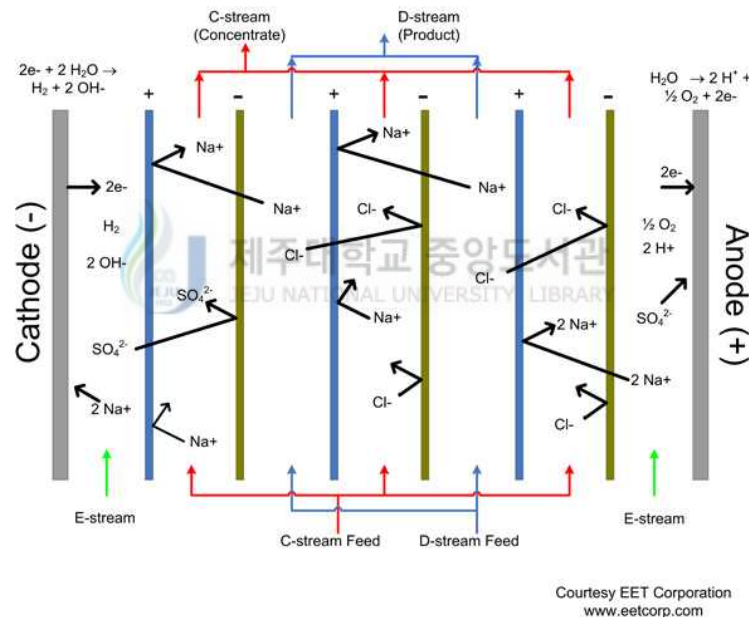
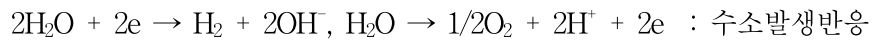
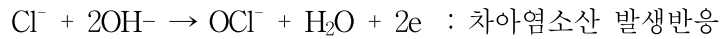


Fig. 15. The principles of electrodesalination method

전극을 통하여 물을 분리하는 것을 구동력으로 하기 때문에 각각의 전극에서는 염소이온과 반응하여 차아염소산이 발생하는 반응과 물이 전기분해되어 산소와 수소가 발생하는 반응이 형성될 수 있다. 이러한 부작용으로 인하여 과전압 등의 반응이 발생할 가능성이 있으므로 이러한 현상을 극소화 하는 것이 해수담수화 효율을 위해

중요한 요소로 작용한다(Fritzmann., 2007; Graham., 1992).



전기투석법은 회수율이 높으며 역삼투법보다 전처리공정에 덜 민감하고 전처리시 화학약품 소요량이 작다는 장점이 있다. 일반적으로 brackish water용으로 많이 적용되었으며, 1500~3500 mg/L TDS농도를 500 mg/L TDS로 처리하는데 소요되는 에너지 요구량은 1.5 - 4 kWh/m³으로 보고되고 있으나, 해수에 적용하기에는 에너지 소비비용이 너무 커 현장에 직접적인 적용이 힘든 것으로 알려진다. 현재까지 바닷물로부터 담수를 만든 경우는 약 20~30 여개가 보고되고 있으나, 소규모로 3,000 m³/일 이내의 처리용량만이 보고되었다.



4.4. 담수화 전처리 공법 및 특징

담수화 공정은 Fig. 16과 같이 취수시설, 전처리시설, 역삼투시설, 후처리시설 등으로 크게 나눌 수 있다. 취수시설은 원수를 취수하는 것으로 대규모시설의 경우 심층 취수방식, 중소규모 시설은 해안 구조물 또는 지하 관정 취수 방식이 있으며, 관정에 의한 취수가 운영관리에 가장 경제적이다.

전처리시설은 막의 수명과 성능 유지를 위해 미세한 모래, 미생물, 고형물질 등 사전 제거 하는 방법으로 물리적 방법과 화학적 방법이 있으며, 대부분 물리적 방법과 화학적 방법을 병행하여 전처리 하고 있다. 대표적인 전처리 방법으로는 MF, UF 막을 이용하는 막여과 전처리, 가장 오랫동안 이용하고 있는 여과사 등에 의한 다층여과기, 활성탄여과기 등의 방법이 있다. 처리수 공정에서 MF, UF 막여과를 적용하는 경우 RO 막 오염물질의 제거효율이 높아 역삼투 공정의 회수율을 향상시

키고 화학세정 주기를 연장시킴으로써 경제성을 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(금호건설, 2011).

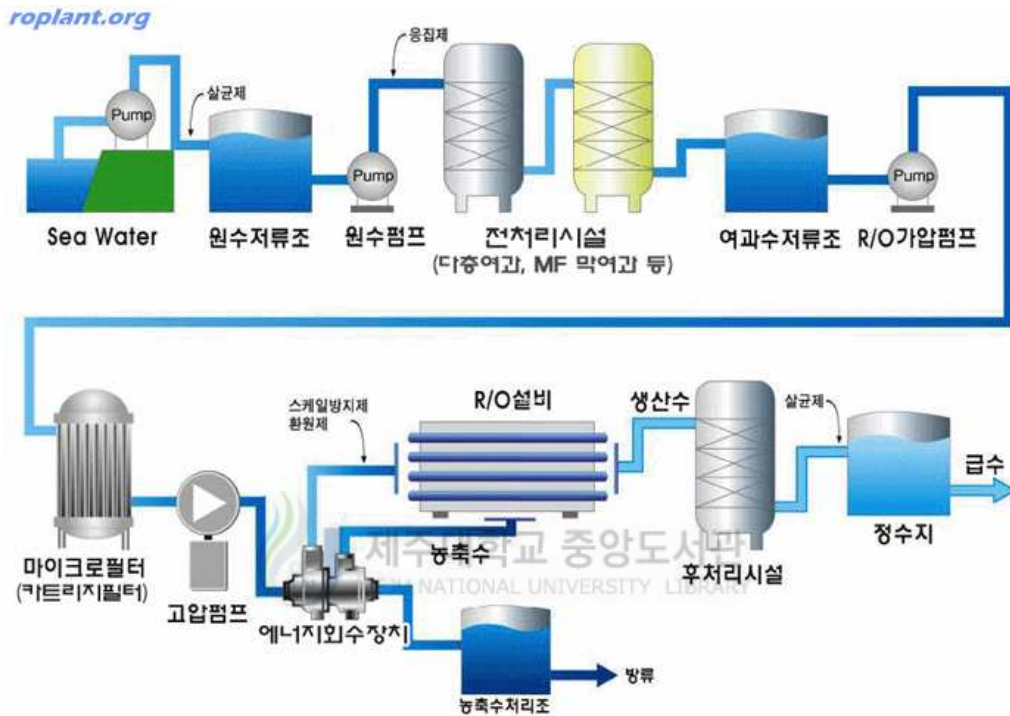


Fig. 16. The distribution diagram of reverse osmosis desalination facilities

4.4.1 전처리 성능 평가

역삼투 담수화 공정에서 전처리 수질은 역삼투공정 운영에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 전처리 성능은 탁도, 전기전도도, 염소이온의 제거능으로 평가하기 어려우므로 Silt density index(SDI)를 측정하여 평가하고자 하였다(Boerlage, 2003). SDI란 Table 6와 같이 역삼투법에서 막모듈에 공급되는 공급수 중 미량의 부유물질의 정도를 정량화한 것으로, 미량의 부유물질을 정량화하는 지표로 가장 널리 적용된다. 이러한 SDI에 대한 선택기준은 낮으면 낮을수록 좋지만 경제적인 문제로 인하여 대부분 상업화

된 막제조 회사에서 요구하는 수질을 기준으로 선택하며, 이에 대하여 취수수질에 따라서 요구 SDI를 맞추기 위하여 공정선택을 하는 경우가 대부분이다. 이는 막제조 회사에서 보증하는 역삼투막의 교체시기를 조절하기 위해서이다. SDI가 높을 경우에는 막의 수명과 성능저하 요인, Trans-membrane pressure(TMP) 증가, 역세척 주기 감소(역세척 회수 증가)와 처리효율 저하, 농도분극 발생 등 막에 악영향을 미친다. 그 측정 방법은 0.45 μm 멤브레인 필터를 이용하여 206 kPa로 가압하여 여과하였을 때, 500 mL를 여과하는데 소요되는 시간과 15분간 계속해서 여과한 후 다시 500 mL를 여과하는데 소요되는 시간을 측정한 후 아래의 식에서 계산한다(환경부, 2010).

$$SDI = \left(1 - \frac{T_0}{T_{15}}\right) \times 100/15 \quad (1)$$

여기서, T_0 : 시료를 500 mL, 206 Kpa로 가압하여 여과시킬 때 소요되는 시간, T_{15} : 206 kPa로 가압하여 15분간 여과시킨 후 다시 시료 500 mL를 206 kPa로 가압하여 여과시킬 때 소요되는 시간이다.

일반적으로, 전처리된 처리수가 역삼투막으로 유입되는 공급수의 SDI가 4.0 이하가 되도록 하며, 탁도 기준으로 선정할 경우에는 0.1 NTU 이하의 수질로 처리할 수 있는 설비를 갖추어야 한다(Amirtharajah, 1985; Abdessemed., 2000).

Table 6. The evaluation criteria for the preconditioning equipment by SDI_{15}

SDI	적 용	비 고
$SDI < 2$	전처리 없이 RO 사용 가능	
$SDI < 3$	전처리 없이 NF 사용 가능	
$3 < SDI < 5$	중공사막 멤브레인을 전처리공정으로 사용가능	

4.4.2 전처리 공법별 특징

(1) 정밀여과법 (Microfiltration)

정밀여과란 용질의 크기가 0.1-10 VS 정도인 용질의 분리하는 막분리 공정으로, 이때 사용되는 막은 공경의 약 0.01-10 VS 정도이고, 세공이 막 총용적의 80 % 정도를 차지하는 것이 적합하다. 막의 재질로는 Cellulose 계통이나 Nylon, PVC, Polytetrafluoro ethylene(PTFE) 등 여러 고분자물질 등이 적합하다.

정밀여과 공정에서 추진력은 압력차로 표시되는데, 이때 압력차는 일반적으로 10-100 psig이다. 이 막의 분리효과는 근본적으로 막의 공경과 분리 대상물질의 크기에 의하여 좌우된다. 분리대상 물질의 크기가 공경에 비하여 작아도 전부 막을 통과하는 것은 아닌데 분리대상 물질이 막에 흡착되거나 세공 부근에서 입체장애(steric hindrance)에 의해 투과되지 않는 것이 그 예다. 정밀여과 공정의 가장 큰 문제는 막 표면에서의 콜로이드 물질의 침착현상으로, 세공을 막음으로써 정밀여과의 효과를 상대적으로 저하시키는데 이는 막을 교체하거나 재생시켜 원상으로 회복시킬 수 있다.

(2) 한외여과법(Ultrafiltration)

한외여과란 분자크기가 10 ~ 1000 Å에 달하는 Macromolecule이나 콜로이드 입자를 분리하는 막분리 공정으로 막의 공경은 20 ~ 500 Å범위이다. 이 방법은 역삼투법과 유사한 분리조작법으로 압력차를 추진력으로 사용한다. 한외여과에서 사용하는 압력차는 대개 1 ~ 100 psig 범위인데, 이는 분자량이 큰 입자는 상대적으로 삼투압이 낮기 때문에 삼투압 이상의 압력을 가하는데 고압을 요하지 않기 때문이다. 한외여과는 수학적 모델링이 역삼투압과 같으나, 근본적으로 역삼투법과 상이하다. 역삼투법의 분리조작은 막과 용존염과의 상관성에 의해 주로 지배되는 반면, 한외여과법은 용질 및 공경의 크기에 의해 거의 지배된다.

즉, 한외여과는 미세공 입구에서 입체장애 와 세공 내에서 용질과 세공벽간의 마찰저항에 의해 분리효과가 나타난다. 한외여과법에서 분자량절단(molecular weight cut-off)은 중요한 항목으로 이때 기울기가 무한대에 가까워질수록 분자량의 절단상태가 예리해 지므로 우수한 여과막으로 간주할 수 있다. 한외여과는 분리대상물의 크기 면에서 볼 때 역삼투법과 정밀여과법의 중간으로 산업 이용분야가 광범위하고, 막재질은 친수성이 있어야 한다는 측면에서 볼 때 역삼투압막의 재질과 같고 단지 세공의 크기가 클 뿐이다.

(3) 다층여과기

다층여과기란 정수 및 폐수처리과정에서 수질의 개선을 위해 사용하는 공법으로서 Fig. 17과 같이 적당한 다공물질층에 탁도가 있는 액체를 통과함으로써 탁도를 제거하는 방법이다. 내부에 3~6층의 모래, 자갈, 안스라이트 여과사와 같은 여과재로 형성하여 상층여과재는 가볍고 굵으므로 크고 굵은 불순물을 하층여과재는 무겁고 가늘기 때문에 미세한 불순물을 제거함으로써 탱크내부의 전체가 여과층을 형성하여 원수를 10~20 μm 정도의 입자를 제거할 수 있다



Fig. 17. The mimetic diagram of multiple media filters

5) 활성탄여과기

활성탄여과기는 Fig. 18와 같은 형태로 활성탄을 여재로 하는 여과기로서 물리적인 여과효과 및 활성탄 특유의 흡착력을 이용하여 원수중의 유기물제거, 잔류염소, 색, 맛, 냄새를 흡착제거하기 위한 장치이다. 활성탄은 $1000 \sim 1600 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 표면적을 갖고 있어서 강한 흡착력을 갖고있다. 이것 때문에 반도체의 재료와 전자류와 전착도료관계, 보일러용수, 전처리용수, 식품용수, 순수제조장치의 전처리용으로 사용된다.

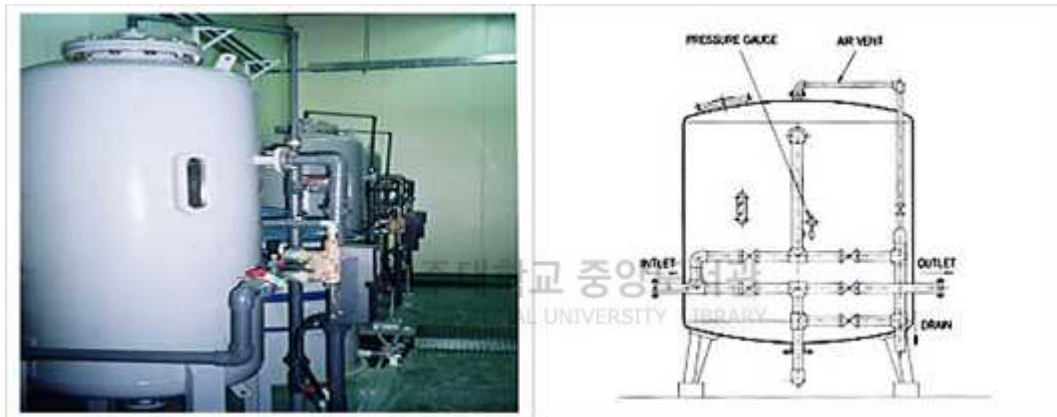


Fig. 18. The mimetic diagram of activated charcoal filters

III. 연구방법

1. 연구 대상

연구 대상 지역은 삼양 3수원으로 Table 7에서 보는 바와 같이 제주도 삼양1동 바닷가에 개발된 용천수로 시설용량 1일 2 만m³, 총사업비 143억원, 사업기간 1992년부터 1995년이며, Fig. 19와 같이 도련정수장의 원수로 활용하고자 하였으나, 개발 이후 염소이온농도 먹는물 수질기준 초과되어 현재는 예비시설로 운영관리 되고 있는 취수원이다.

Table 7. The outline of the facilities subject to study

모형실험 위치	<ul style="list-style-type: none"> 제주도 삼양1동 1912-2번지 삼양 3수원지 내
실험기간	<ul style="list-style-type: none"> 2013년 10월 8일 ~ 2014년 1월 10일(90일)
적용공법	<ul style="list-style-type: none"> 역삼투압법(Reverse Osmosis) + 전처리공법
설비용량	<ul style="list-style-type: none"> 50 m³/일, at 25℃
실험조건 설정	<ul style="list-style-type: none"> 설계인자 도출항목 : 수량(막여과유속), 회수율, 막차압, 수온, 전력량 전처리공정 : 교체 적용(활성탄여과기,다층여과기,디스크필터) 약품주입 : 주입/미주입 고도처리 공법 : 역삼투압법(RO)
시설 위치도	

삼양 3수원의 용출량은 98년 4월 측정 당시 2곳(우수물골, 가막작짓물)에서 20,000 m³/일 이었으나, 99년 10월 측정에서는 1곳(가막작짓물) 용출량이 1,190 m³/일 조사되어 총수량의 변화폭은 11,190 ~ 20,000 m³/일 정도이며 안정적인 원수 공급을 고려하여 시설 도입 시에는 재차 용출량 조사는 필요한 실정이다(수자원본부, 1999).

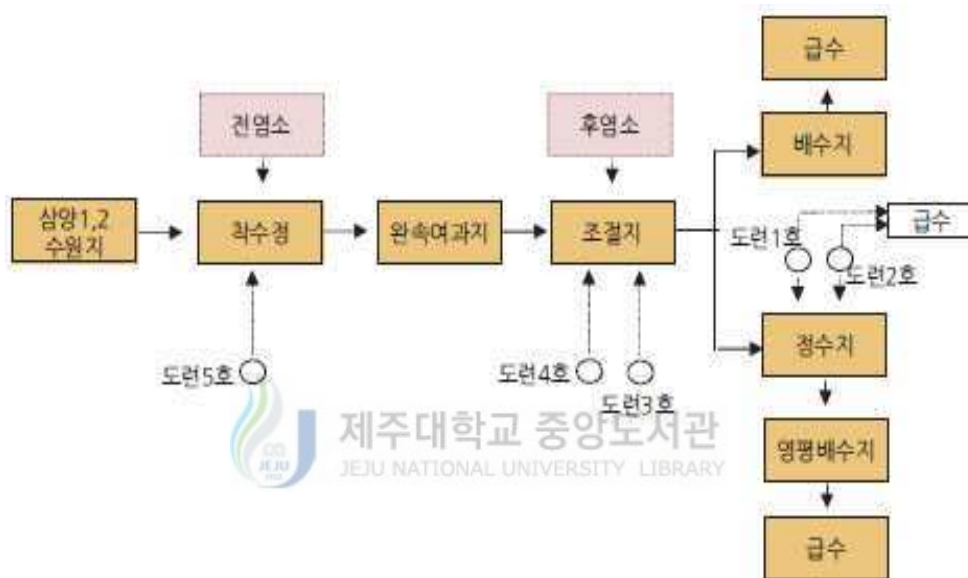


Fig. 19. The distribution diagram of the treatment of Doryeon filtration plant.

삼양 3수원의 수질상태는 바닷물 유입으로 염소이온농도 편차가 심히며 수질기준을 초과한 상태로 2006년 6월부터 2010년 11월까지 측정한 결과에 따르면 염소이온 농도는 91~1,170 mg/L 로 높게 나타나고 있다. 특히 Fig. 20의 경우 2009년 봄 가뭄으로 강우량이 감소되면서 염소이온이 증가한 것으로 나타나고 있어 용천수의 수질이 강우량에 따라 영향을 받는 것을 알 수 있다. 반면, 질산성질소는 Fig. 21과 같이 먹는 물 수질에 적합 하며 거의 변화 없는 것으로 나타났다. 탁도 역시 연중 거의 일정하게 나타나고 있으나 Fig. 22 및 Table 8과 같이 장마 및 태풍 등 발생 시에는 영향을 받는 간헐적으로 높아지는 것을 알 수 있다.

현재의 수질 상태를 고려하면 탁도가 양호 하고, 질산성질소 오염이 거의 없어 사실상 염소이온을 제거한다면 상수원으로 이용하기는 적합한 것을 알 수 있다. 염소이온은 일반적인 여과방법으로는 제거할 수 없어 RO 멤브레인을 이용하는 담수화 공정 도입이 필요하며, 공정 구성에는 안정적인 탁도 상태를 고려하여 표면 해수담수화 보다 단순화 할 수 있어 시설비 및 운영관리비를 줄일 수 있는 특징이 있다.

담수화 최적 공정 구성을 위하여 Pilot Plant(모형 실험 장치) 실험을 실시하고 설계인자를 도출, 역삼투막의 처리효율 검증, 담수화 공정 구성에 따른 경제성 및 유지관리비를 산출하고자 하였다. 절감을 위한 시설비 산출 등을 도출하고자 삼양 3 수원지 내에 Pilot Plant를 설치되었다.

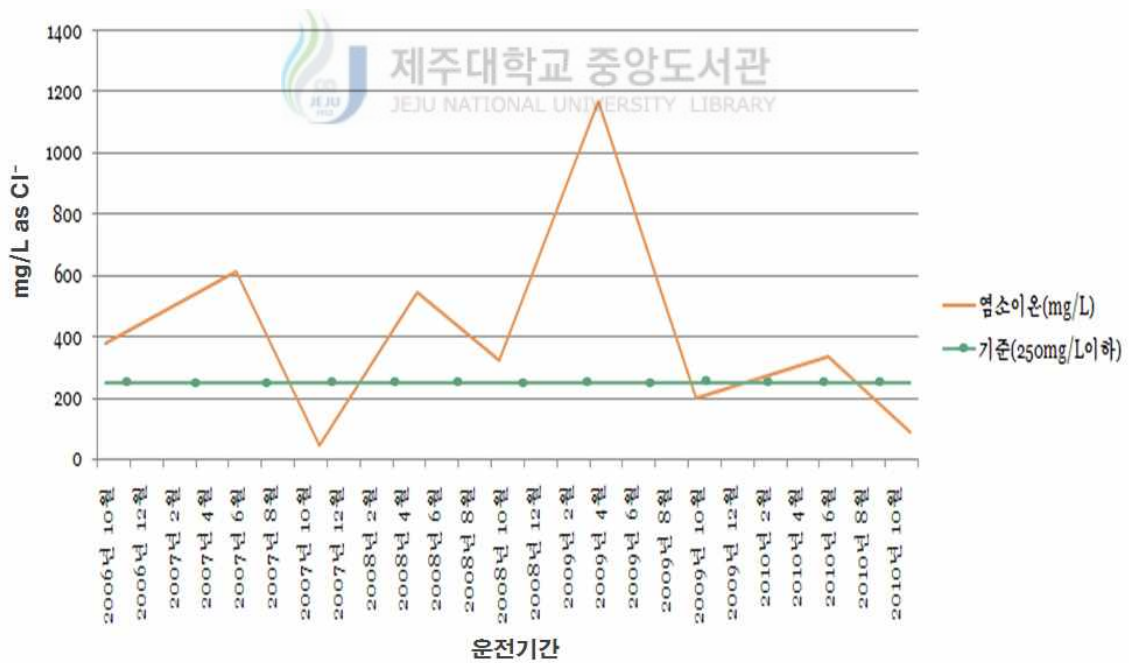


Fig. 20. Chlorine ion of Samwon 3 catchment area (June 2006~November 2010)

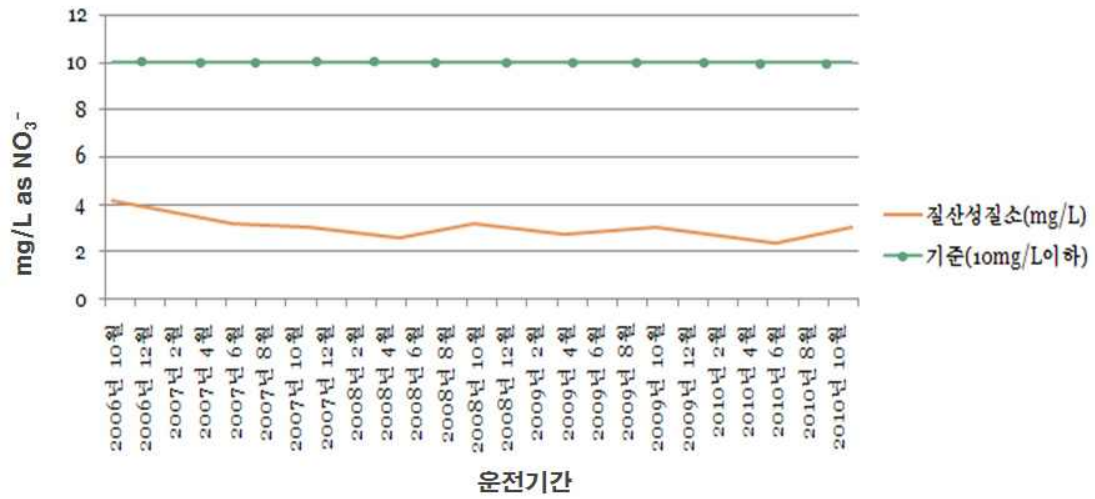


Fig. 21. Nitrate nitrogen of Samwon 3 catchment area (June 2006~November 2010)

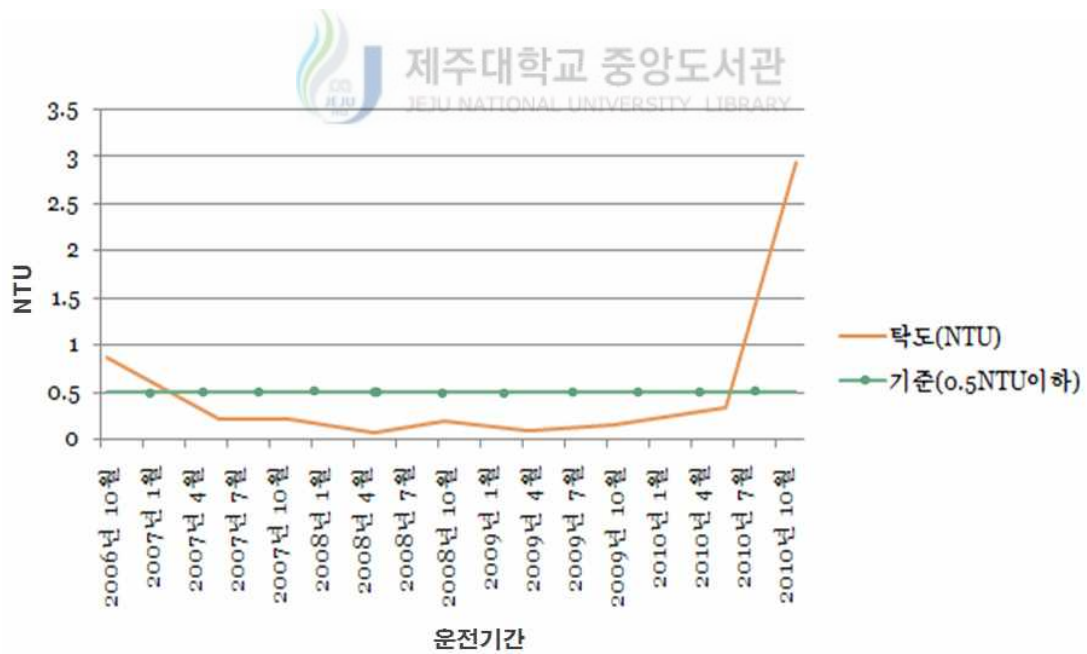


Fig. 22. Turbidity of Samwon 3 catchment area (June 2006~November 2010)

Table 8. water quality standard and current quality state of Samyang 3 catchment area (2006.6~2010.11)

구 분		질산성질소 (mg/L)	염소이온 (mg/L)	탁도 (NTU)
		수질 기준 10 mg/L 이하	수질 기준 250 mg/L 이하	수질 기준 0.5 NTU 이하
2006년	6월	3.2	-	-
	10월	4.2	381	0.87
2007년	6월	3.2	613	0.22
	11월	3.1	48	0.22
2008년	5월	2.6	550	0.069
	10월	3.2	326	0.19
2009년	4월	2.8	1,170	0.093
	10월	3.1	200	0.142
2010년	6월	2.4	335	0.325
	11월	3.1	91	2.93

* 일일측정으로 진행하였으며, 상반기 하반기 평균값으로 나타냄

2. 실험 장치

실험 장치는 향후 담수화 공정이 도입을 고려하여 취수시설, 전처리시설, 역삼투 시설 및 약품투입시설 등으로 시설용량은 50 m³/일 규모의 Pilot Plant를 구성하였다. 공정 계통도는 Fig. 23와 같이 취수펌프(우물) → Raw water tank → Raw water pump → 전처리공정(A/C Filter, Multi media filter, Disc filter, Softner) → Micro filter → High pressure pump → Reverse osmosis unit → Product water tank 순으로 구성되었으며, 기기별 세부 사양은 Table 9, 10에 나타내고 있다.

취수시설은 기 개발된 용천수에 시설용량 5.0 m³/hr, 재질 STS 304의 수중펌프 1대를 설치하여 원수를 취수하고 2 m²의 옥외형 Polyethylene 수조에 저수후 RO 원

수 펌프를 이용하여 전처리시설에 공급하는 구조이다.

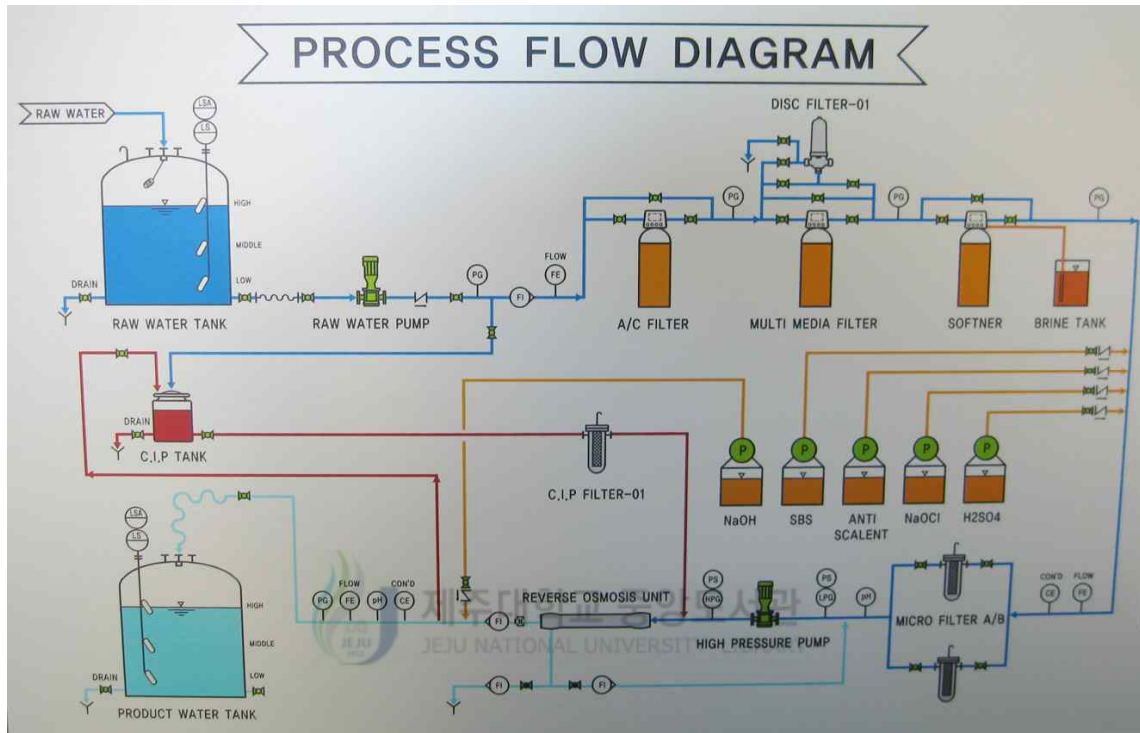


Fig. 23. The composition of the process of the pilot plant

전처리 공정은 원수중의 현탁물질을 제거하여 RO Membrane 성능 저하를 막고 기능을 유지시키기 위한 목적으로 운영되는 중요 공정 중 하나이다. 본 Pilot Plant에서는 최적의 공정 선정 위하여 활성탄여과기, 다층여과기, 디스크필터, 연수기를 설치하고 서로 다른 방법으로 각각 운영 할 수 있도록 하였다.

활성탄여과기는 인근 주거지역에서 유입될 수 있는 유기물 제거와 탁도물질 제거를 위함으로 규격은 D 336 mm, H 1,398 mm 이며, 입상활성탄은 요오드가 1,075 mg/g 삼처리활성탄소를 사용하였으며, 여과기 구성은 지지층 자갈 20 L, 입상활성탄 130 L, EBCT는 3.8 min이다.

다층여과기는 원수중의 탁도 물질 제거를 주안점으로 하여 안트라사이트와 모래로 구성된 일반적인 2중 여재 형태로 규격은 D 336 mm, H 1,398 mm 이며, 여과기 구성은 지지층 자갈 20 L, 여과사 30 L, 안트라사이트 100 L로 구성되었다. 여과사의 경우 유효경 0.45 ~ 0.7 mm, 균등계수 1.7 이하, 안트라사이트는 상수도정수용으로 유효공 0.85 mm, 균등계수 1.5 이하를 사용하였다.

디스크필터의 경우는 설치면적을 최소화할 수 있는 전처리방안으로 ASUD 사의 자동 역세형 디스크필터로 Pore Size 20 μm 을 사용하였으며, 경수연화장치(연수기)는 RO 멤브레인 표면에 발생할 수 있는 Ca^{2+} , Mg^{2+} 등 경도 성분 제거를 목적으로 D 336 mm, H 1,398 mm 규격의 음이온수지 탑을 이용하였다.

전처리 여과기 후단에는 Cartridge 형식의 Micro Filter를 두어 여과 후에 존재 할 수도 있는 전처리수 중의 이물질을 제거함으로써 RO 멤브레인 표면의 Scratcher를 예방하고자 하였다. Micro Filter는 Polypropylene 재질로 길이 20 inch, Pore Size 5 μm 의 필터를 사용하였다.

역삼투장치(Reverse Osmosis UNIT)는 역삼투압을 공급하는 고압펌프, 탈염용 멤브레인, 압력 Vessel 및 계측기기 등으로 구성되었으며 회수율 70%, 1 단으로 구성하였다. 고압펌프는 멤브레인에 역삼투압을 공급하는 시설로 STS304 재질로 입형 다단 형식, 유량 3.0 m^3 , 양정 160 m, 소요동력 5.5 kw이며 구동 방식은 기동 충격을 최소화하기 위하여 인버터 구동방식으로 구성하였다.

멤브레인은 Spiral Wound Type으로 규격은 8 inch \times 40 inch, Vessel 당 3 ELEMENT가 적용되었으며, 생산수량 및 농축수량은 2.1 : 0.9 m^3 /일으로 웅진케미칼(주)의 Polyamide 재질의 BWRO 멤브레인이 적용되었다. Vessel의 경우는 FRP 재질의 규격 8 inch \times 3 M, 1 개 사용되었다.

계측기기는 수질의 안정성 확보 및 기기보호를 위하여 고압펌프 전·후단 압력스위치, 원수·정수측 유량계 및 전기전도계 등을 설치하여 실시간으로 압력, 수질 등

을 관리되도록 하였다.

약품투입시설은 RO 공급수의 수질을 조절하여 역삼투막 오염 방지, 성능 저하 예방을 위하여 전처리공정에는 H_2SO_4 , 후처리공정에는 NaOH를 주입할 수 있도록 구성하였다. H_2SO_4 은 전처리수에 포함된 경도성분(칼슘 및 마그네슘) 등이 역삼투막에 농축되어 스케일로서 석출되지 않도록 pH를 낮추고자 사용하였다. NaOH는 RO 처리수의 특징인 pH 저하를 고려하여 먹는물 수질 기준에 적합하도록 수소이온농도 5.8 ~ 8.5를 유지할 수 있도록 주입하였다.

담수화 공정에서 최종 처리수 pH가 낮아지는 이유는 RO 멤브레인에 의해 이온 물질들이 제거되어 거의 순수한 물이 되면서 대기중의 이산화탄소(CO_2) 흡수력이 높아져 수중에 탄산(H_2CO_3)이 다량 남기 때문이다.



Table 9. Equipment specifications of the Pilot Plant (1)

구 분	제 원	비 고
Intake Pump	<ul style="list-style-type: none"> - 형식: 수중펌프 - 수량: 1대 - 용량: 5.0 m³/Hr* 20 mH - 재질: CASING & IMPELLER STS 304 - 모터: 380 V * 60 Hz * 3Φ * 0.75 kW 	
Raw water Tank	<ul style="list-style-type: none"> - 형식: 직립 원통형 - 용량: 2 m³ - 재질: Polyethylene - 크기: Φ1440 * H1800 - 부대설비: 레벨 스위치 	
Raw water pump	<ul style="list-style-type: none"> - 형식: 입형 다단 - 수량: 1대 - 용량: 3.8 m³ * 25 mH - 재질: CASING & IMPELLER STS 304 - 모터: 380 V * 60 Hz * 3Φ * 0.55 kW 	
Active Carbon Filter	<ul style="list-style-type: none"> - 형식: 활성탄 흡착(여과수량 3.0 m³/h) - 용량: 150 L - 수량: 1대 - 재질: FRP (16" * 65") 	EBCT : 3.8 min
Multi Media Filter	<ul style="list-style-type: none"> - 형식: 복합여과 - 용량: 160 L (자갈 20 + 모래 40+ 안트라사이트 100) - 수량: 1대 - 재질: FRP (16" * 65") 	안트라사이트 + 모래
Softner	<ul style="list-style-type: none"> - 형식: 이온교환수지 - 용량: 160 L - 수량: 1대 - 재질: FRP (16" * 65") - 운영압력 : 8 kg/m² 	음이온 교환수지
Disc Filter	<ul style="list-style-type: none"> - 형식 : 자동 역세형 디스크 필터(AZUD) - 규격 : 전장 2", Pore Size 20Micro (수량 1 pcs) - 재질 : Well / K-RESIN - 운영압력 : 10 kg/m² (3 m³/Hr) 	

Table 10. Equipment specifications of the Pilot Plant (2)

구 분	제 원	비 고
Micro Filter	<ul style="list-style-type: none"> - 형식: CARTRIDGE 타입 - 용량: 3.0 m³/ Hr - 수량: 12대 - 재질: PP - CARTRIDGE <ul style="list-style-type: none"> - 전장: 20" - Pore Size: 5 Micron - 수량: 1pcs 	
High Pressure Pump	<ul style="list-style-type: none"> - 형식: 입형 다단 - 수량: 1대 - 용량: 3.0 m³/Hr* 160mH - 재질: CASING - STS 304 IMPELLER - STS 304 - 모터: 380 V * 60 Hz * 3Φ * 5.5 kW 	
Reverse Osmosis UNIT	<ul style="list-style-type: none"> - 형식: Spiral Type RO - 수량: 1 LOT - 용량 <ul style="list-style-type: none"> - 생산수: 2.1 m³/ Hr (at 25°C) - 농축수: 0.9 m³/ Hr (at 25°C) - ARRAY: 1ARRAY (3Module) - 막사양(Membrane) <ul style="list-style-type: none"> - 크기: 8" * 40" - 재질: POLYAMIDE - MAKER: 웅진케미칼(주) - VESSEL <ul style="list-style-type: none"> - 크기: 8" * 3M * 1pcs - 재질: FRP - MAKER: ROPV - 회수율: 70% - INSTRUMENT <ul style="list-style-type: none"> - 압력계 - 유량계 - CONDUCTIVITY - pH - PRESSURE SWITCH 	

3. 실험 방법

실험방법은 삼양 3수원의 원수를 대으로 모형실험장치에 각각의 전처리 공정을 적용하여 데이터에 의한 최적의 공정을 확보하고자 진행하였다. 운전은 Table 11와 같이 활성탄여과기, 다층여과기, 디스크필터 및 연수기 공정을 각각 Mode 1~ 4로 나누고 공정별로 16일 이상 운영하였다.

수질검사는 일일검사, 주간검사 및 월간 검사로 나누어 실시하였으며, 일일검사는 원수, 전처리수 및 생산수에 대하여 pH, 탁도, 맛, 냄새, 유리잔류염소, 전기전도도, 온도, 압력 그리고 원수와 전처리 성능 비교를 위한 SDI₁₅ 측정, 주간검사는 염소이온, 질산성질소 및 대장균은 주간검사를 실시하는 한편, 월간검사는 경도, 암모니아성질소, 보론, 과망간산칼륨소비량 등을 실시하였다.

운영기간 동안 원수 취수 위치, 고압펌프 및 역삼투시설 가동 방법, 약품은 전처리공정 H₂SO₄, 후처리공정 NaOH 을 주입 등 기본 조건은 동일하게 적용 하였다. 운영초기(10.8 ~ 10.27일)는 기계시설의 안정화를 위하여 전처리 성능 비교 없이 원수, 전처리수 및 생산수의 수량 및 계측기기의 안정화에 주력하였다.

Table 11. Establishing operation methods of model experiments (Testing the operation of preconditioning equipment) (2013년)

구 분	활성탄여과기	다층여과기	디스크필터	연수기	기간(일)
Test	◎	◎	◎	◎	10/08 ~ 10/27 (20일)
Mode 1	◎	-	-	-	11/02 ~ 11/17 (16일)
Mode 2	-	◎	-	-	11/18 ~ 12/03 (16일)
Mode 3	-	-	◎	-	12/04 ~ 12/19 (16일)
Mode 4	-	-	-	◎	12/20 ~ 1/10 (22일)

Mode 1에서 전처리공정은 활성탄여과기를 적용하였으며, 운영기간은 2014. 11. 2 ~ 11. 17일까지로 전체적인 공정 구성은 원수 취수 → 활성탄여과기 → 마이크로필터 → 역삼투 공정 순서로 16일간 운영하였다. 이 기간 동안 수질검사는 1일 검사 및 원수 및 전처리수의 SDI₁₅를 측정, 회수율 70%, 원수 pH 7.3 ~ 7.5를 전처리공정에서 6.7 ~ 6.9로 조절하는 등 일반사항은 모든 Mode에서 동일하게 적용하였다.

Mode 2에서는 전처리 공정은 안트라사이트 및 여과사로 구성된 2중 여재 방식의 여과기를 적용하였으며, 운영기간은 11. 18 ~ 12. 3일까지 Mode 1과 동일하게 16일간 운영하여 전처리 성능을 비교 분석하였으며 약품에 의한 pH 조절 등을 동일 조건으로 운영하였다.

Mode 3에서는 전처리공정에 따른 건축면적을 최소화하기 위하여 디스크필터에 의한 전처리 공정을 적용하여 12. 4 ~ 12. 19 일까지 운영하였으며, Mode 4에서는 RO 멤브레인 스케일 방지와 전처리성능 비교를 위하여 음이온수지에 의한 연수기를 12. 20 ~ 1. 10일까지 약 22일을 운영하였다. 당초 16일 주기로 교체하는 것으로 추진하였으나 연수기 재생후 전기전도도 및 염소이온농도 상승 문제 등을 분석하고 해결하기 위하여 6일을 추가로 운영하게 되었다.

IV. 결과 및 고찰

1. 파일럿 플랜트 운전결과

1.1. 전처리 공정

삼양 3수원지 담수화 공정 도입 연구를 위한 모형실험을 수행한 결과 수온, 전기전도도, 색도는 원수, 전처리 이후 큰 변화가 없어 주요 요인으로 작용하지 않았다. 반면 탁도의 경우는 원수 수질 자체가 매우 양호하였으나 간헐적인 탁도 상승과 SDI₁₅ 분석 결과 전처리공정 도입은 필요한 것으로 나타났다. 염소이온 농도는 전기전도도 변화 패턴과 매우 일치하며 최종 담수화 처리수는 매우 양호하게 나타났다.

세부적인 운전 결과는 Fig. 24의 보면 수온의 경우 간조와 만조시에 맞추어 변화를 조사하였으며, 그 결과 운전 기간 동안 유입되는 원수의 수온은 11.5~16.0℃(평균 15.2℃)로 간조와 만조의 영향은 없었으며, 계절에 영향으로 점점 감소하는 추세를 보였다.

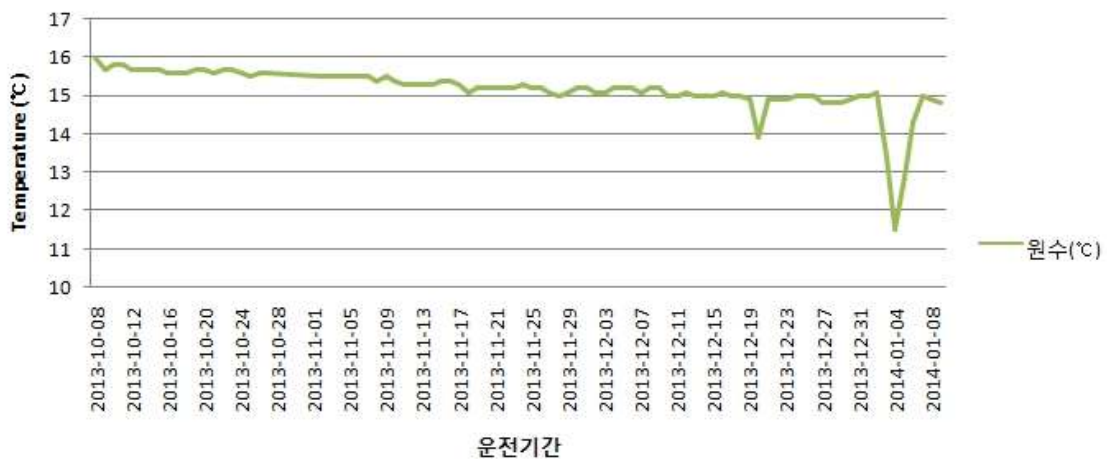


Fig. 24. The results of operating water temperature

수소이온농도(pH)의 경우는 Fig. 25에서 보는 바와 같이 원수 및 전처리수의 값을

살펴보면 7.1~7.7(평균 7.4)로 큰 변화가 없었다. 하지만 RO 처리수의 pH가 다른 원수 및 처리수에 비해 낮은 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 pH는 해수의 경우 약 8.3 정도이나 역삼투막의 스케일을 억제하기 위해 황산을 주입하여 6.5~7 정도로 조절하여 공급되면 최종 RO 처리수는 경우 이온물질 제거로 순수 물에 가까워지면서 공기중의 이산화탄소가 용존 되어 pH가 감소하기 때문에 먹는 물 수질 기준인 pH 5.8~8.5을 만족시키기 위해 NaOH을 주입된다.

과일렛 운전기간 동안 pH는 유입원수의 경우 해수 8.3보다 낮은 범위인 7.1~7.7로 평균 약 7.4 정도로 유입되었으며, RO 처리수는 6.5~6.9 정도로 생산수의 평균은 약 6.7이 되어 먹는물 수질 기준에 적합하였다.



Fig. 25. The results of operating hydrogen ion concentration (pH)

탁도의 경우 Fig. 26에서 보는 바와 같이 원수 0.15~0.5 NTU, 평균 0.21 NTU로 유입되었으며, 전처리수는 0.11~0.52 NTU, 평균 0.18 NTU로 원수보다 14.2% 개선된 것을 알 수 있다. 또한 RO 처리수는 0.08~0.18 NTU, 평균 0.10 NTU로 최종 처리수 수질은 먹는물수질기준 0.5 NTU와 비교하여 봤을때 매우 만족한 결과를 얻을 수 있었다. 담수화의 경우 전처리 공정 선택은 유입수의 탁도 등 수질에 크게 좌우 되는데 삼양 3수원의 경우 지층에서 1차 여과된 용천수를 원수로 활용하여 매우 안정적인 전처리 공정을 운영할 수 있었다. 이는 취수 방식에 따라 유입수질의 변화가 큰 것을 알 수 있었으며, 용천수는 지하관정에 의한 해수를 취수방식과 거의 동일한 조건이라 할 수 있다.

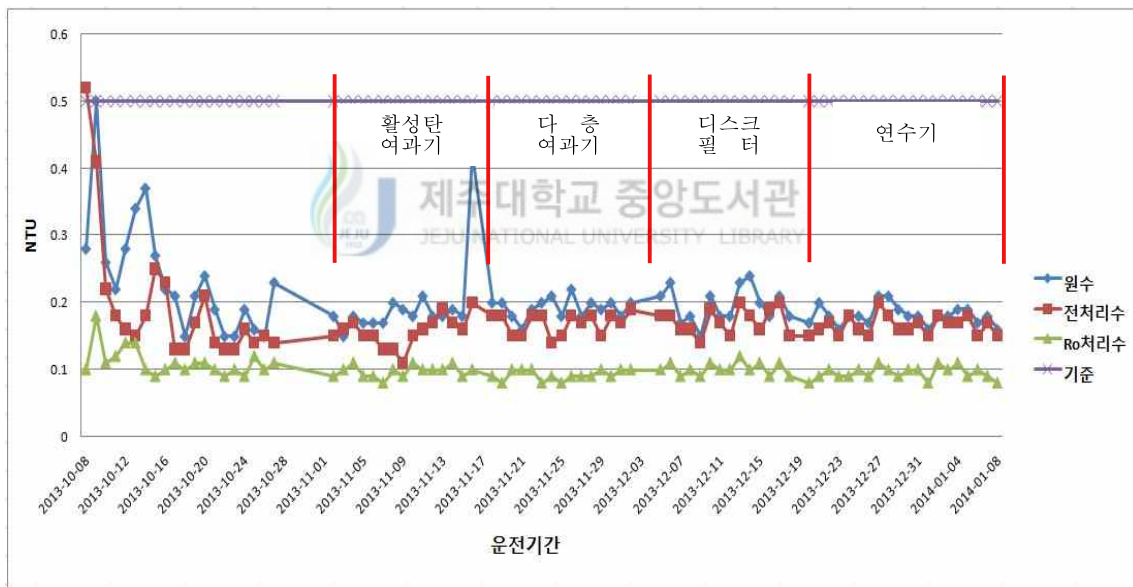


Fig. 26. The results of operating turbidity

Mode 1의 활성탄 여과기 전처리 공정의 경우 원수, 전처리수, RO처리수 탁도는 최대 0.42:0.2:0.11, 최소 0.15:0.11:0.08 순으로 나타났으며, 평균은 0.2 : 0.16:0.1 순으로 원수 탁도의 경우 매우 낮으며 약간의 변동의 있었으나 전처리수 및 RO 처리수

는 매우 안정적으로 나타났다. 또한 탁도 제거율은 원수, 전처리수의 최대, 최소, 평균 값을 분석한 결과 52.4 : 26.6 : 20.0 %로 원수 탁도가 높은 경우 제거율도 높을 것을 알 수 있었다.

Mode 2 다층여과기 전처리 공정의 탁도는 원수, 전처리수, RO처리수 최대 0.22 : 0.19 : 0.1 나타난 반면, 최소값은 0.16 : 0.14 : 0.08, 평균은 0.19 : 0.17 : 0.09 순으로 매우 안정적인 수질 특성을 보여줬다. 반면 탁도 제거율은 원수, 전처리수의 최대, 최소, 평균 값을 분석한 결과 13.6 : 12.5 : 10.5 %로 Mode 1보다 낮은 것을 알 수 있었다.

Mode 3 디스크 필터의 경우 탁도는 원수, 전처리수, RO처리수 최대값은 0.14 : 0.2 : 0.12인 반면, 최소값은 0.15 : 0.14 : 0.09, 평균값은 0.2 : 0.17 : 0.1 순으로 나타났으며, 탁도 제거율은 원수, 전처리수의 최대, 최소, 평균 값을 분석한 결과 16.6 : 6.6 ; 15 % 로 탁도가 낮은 경우에는 제거율이 활성탄여과기 및 다층여과기보다 낮은 것을 알 수 있었다.

Mode 4 연수기의 경우 탁도는 원수, 전처리수, RO처리수 최대 0.21 : 0.2 : 0.11, 최소 0.16 : 0.15 : 0.08, 평균값은 0.18 : 0.17 : 0.1 순으로 나타났으며, 탁도 제거율은 원수, 전처리수의 최대, 최소, 평균값을 분석한 결과 4.7 : 6.2 : 5.6 %로 제거율이 낮게 나타나 탁도제거 효과는 거의 없는 것을 알 수 있었다.

물에 나타나는 색도는 자연적으로 존재하는 철(Fe)이나 망간(Mn)과 같은 금속 물질이나, 식물의 분해과정에서 발생하는 휴믹이나 피트 같은 유기물질, 플랑크톤, 혹은 산업폐수에 의해 발생한다. 겉으로 나타나는 색도는 탁도가 제거되지 않은 원수 상태를 말한다. 그러나 대개 환경공학이나 상·하수도에서 문제가 되는 색도는 탁도가 제거된 상태에서 나타나는 정도를 의미한다. 먹는 물 수질 기준을 보면 색도의 경우 5도 이하를 유지해야 한다. 이것은 유해나 무해를 떠나서 음용수에서는 심미적인 거부감을 없애고, 하·폐수처리장의 방류수에는 거부감을 최소화하기 위한 조치이다. Fig. 27을 보면 색도의 경우 유입 원수의 색도가 1도로, 수질 기준 5도 이하를 만족하였다.

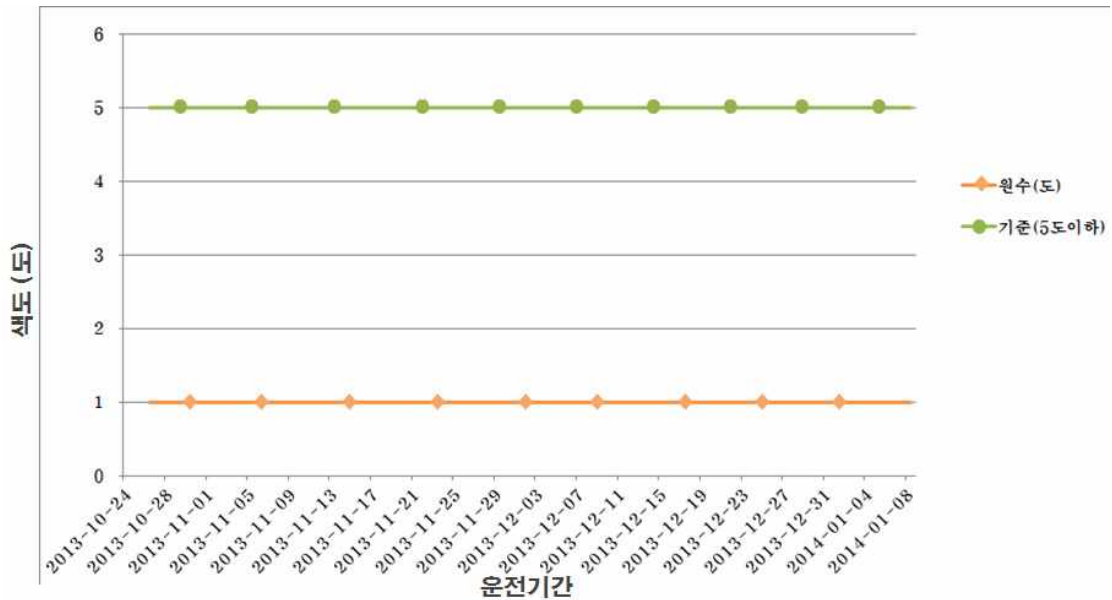


Fig. 27. Influent characteristics of untreated water chromaticity

전기전도도는 Fig. 28에서와 같이 물속에 해리된 이온이 있으면 전기를 통하는 원리를 이용하여 전기의 전도되는 정도로 용존한 염류의 농도를 알 수 있는 지표가 되며, 전기전도도는 25℃의 수온에서 측정된 전기저항의 역수를 기준으로 한다. 보통 축약형으로 EC로 표기하며 단위는 dS/m이다. 위 그래프의 변화를 살펴보면 전기전도도는 1,698~3,960 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 2,203 $\mu\text{S}/\text{cm}$) 범위로, 조수간만에 차에 의해 변화하였다.

12월 후반의 경우 연수기를 이용하여 전처리를 하는 과정에서는 염화나트륨 재생 이후 전기전도도 및 염소이온이 급상승하는 문제점을 보여줬으며, 조사 결과 재생 시 세정 불량으로 나타났으며, 충분한 세정이 이뤄진 이후에는 정상적으로 전처리 되는 것을 알 수 있었다. 반면, 멤브레인 파울링 예방을 위한 해수담수화시설의 전처리 공정으로의 적용은 부적합 할 것으로 판단된다.

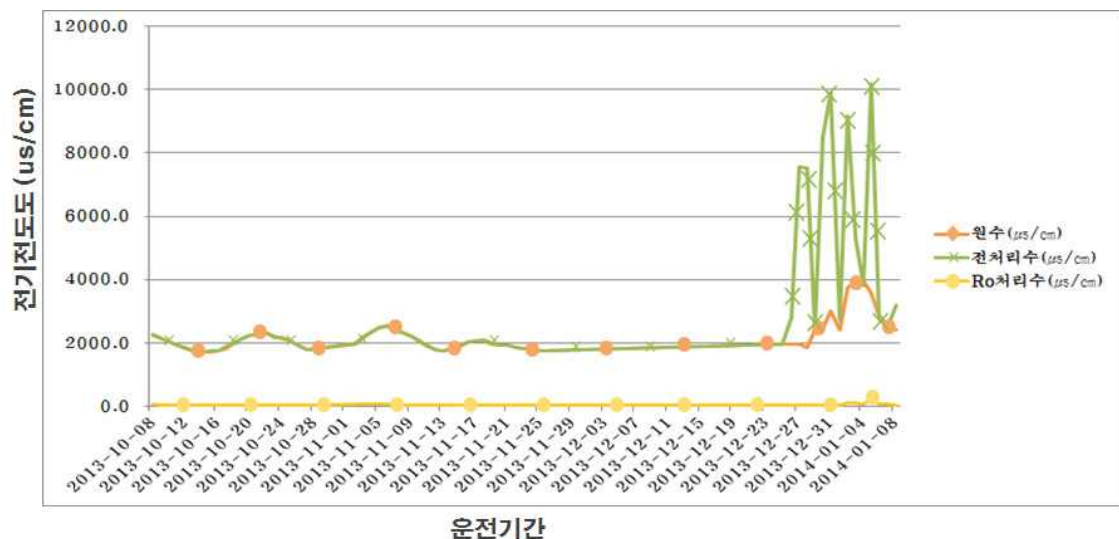


Fig. 28. The results of operating conductivity

염소이온은 Fig. 29와 같이 원수의 경우 439~1,135.3 mg/L (평균 691.4 mg/L) 범위로 유입되었다. 역삼투막에 의한 전기전도도 제거율은 94.5~98.4%, 평균 97.9%로 거의 일정하므로 원수에 따라 처리수의 전기전도도가 달라져 29.5~197 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 46.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$)로 매우 낮아지는 반면에, 전처리에 의해서는 원수의 전기전도도가 거의 제거되지 않는다. 염소이온 또한 전기전도도와 마찬가지로 전처리에 의해 거의 제거되지 않지만 RO 처리수는 7~55.6 mg/L (평균 13.7 mg/L)로 안정적으로 수질기준 250 mg/L 이하를 만족하였다.

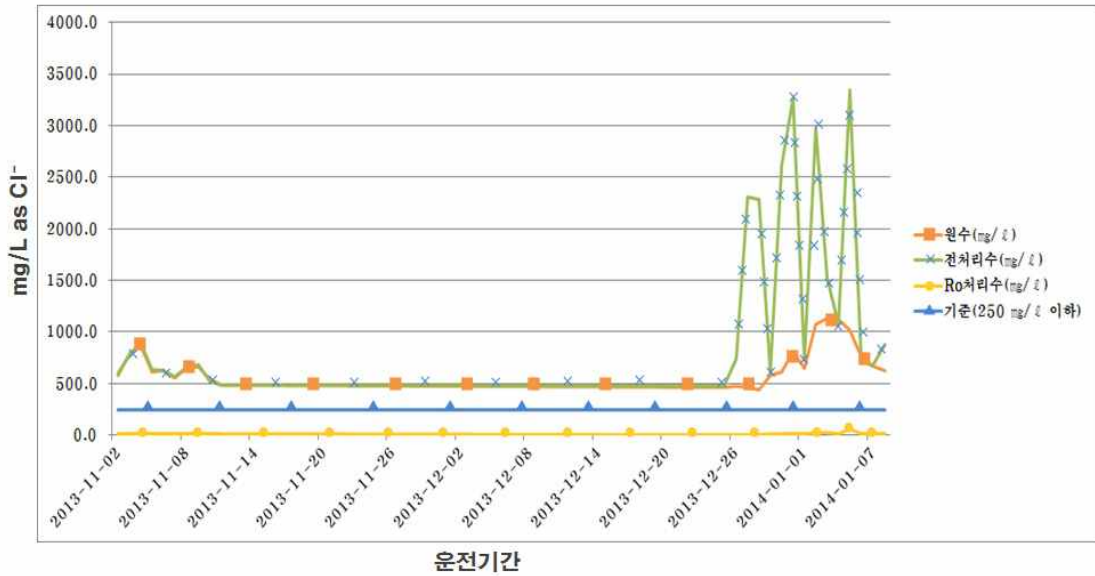


Fig. 29. The results of operating chlorine ion

Pilot Plant에서 원수, 전처리수 및 최종 생산수의 유량 변화는 Fig. 30의 그래프를 보는 바와 같이 유입원수의 유량 변동에 맞추어 전처리 및 RO 공정의 유량 변동의 그래프가 원수 유량 변동 그래프와 유사한 변화 폭을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 지하관정에 의한 염지하수 취수방식을 통해 안정적인 수질을 유입됨으로써 전처리 및 RO 공정에 안정적인 운전이 가능했으리라 사료된다.

활성탄여과기 및 다층여과기로 전처리를 하는 동안에는 원수량, 전처리수량 및 생산수량이 일정하게 나타났으나, 디스크필터 및 연수기를 전처리 여과기로 사용하는 12월 3일부터는 간헐적으로 전처리 수량이 원수 수량을 미량 넘는 것으로 나타났다.

전처리공정 방법별로 원수량과 전처리수량을 비교한 결과 원수, 전처리수 평균수량이 활성탄 여과기 5.92 m³/hr 5.93 m³/h, 다층여과기 5.68 m³/h, 5.38 m³/h, 디스크필터 5.71 m³/h, 5.71 m³/h, 연수기 5.46 m³/h, 5.53 m³/h로 나타났으며, 이는 잦은 역세척과 세정에 따른 유량 소비에 따른 것으로 추정되나 정확한 원인은 확인 할 수 없었다.

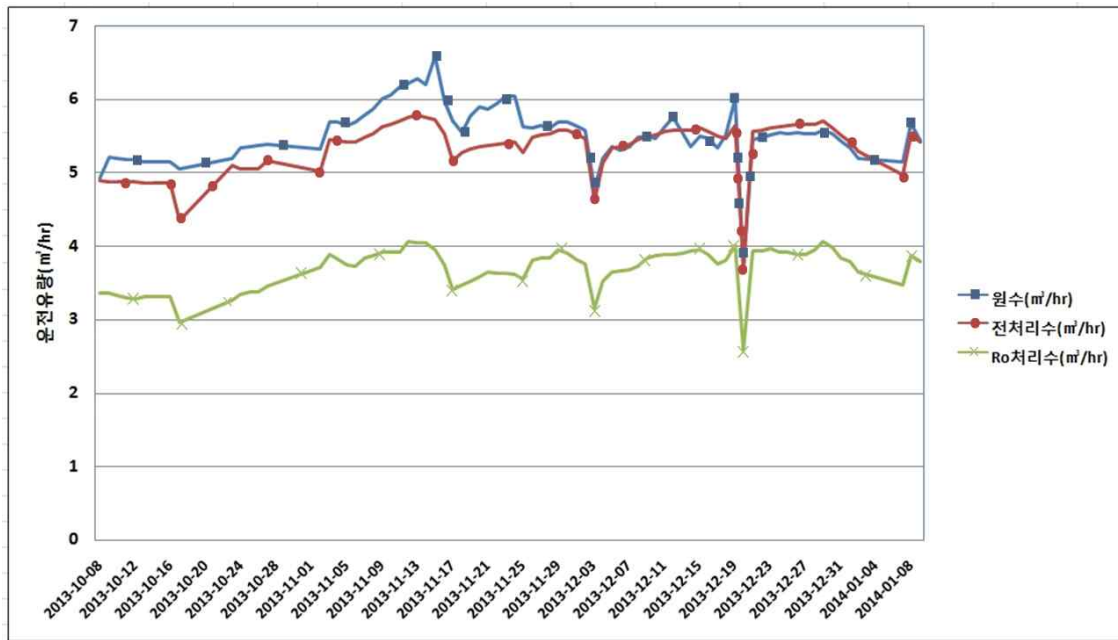


Fig. 30. The results of operating water flow

1.2. 담수화 공정 운영 결과

담수화 공정 구성은 원수를 전처리 공정에서 처리후 Micro Filter를 거쳐 역삼투 장치에서 최종수를 생산하였다. 운영은 역삼투압 15.7 bar, 회수율 70%, 유입수량 3.0 m³/hr, 생산수량 2.21 m³/hr, 원수 pH 7.3~7.5, 역삼투압장치 유입수 pH 6.7~6.9로 운영하였다.

운영결과 전처리 공정 종류에 무관하게 최종 처리수는 먹는물 수질기준에 적합하였으나 연수기의 경우 간헐적으로 원수 전기전도도 및 염소이온농도가 높게 나타나는 특성을 보였으며, 이는 세정시 사용된 염화나트륨 린스 불량의 영향으로 분석되었으며, 전처리 형식별 처리 효율은 다음과 같이 나타났다.

Mode 1의 경우 원수를 활성탄여과기 통과 후 Micro Filter, 역삼투압장치 테스트

를 실시하였으며, 운전시 차압은 $0.1 \sim 0.09 \text{ kg/cm}^2$ 였으며, 전기전도도는 전처리수 $1,755 \sim 2,541 \text{ }\mu\text{S/cm}$ 정도로 조수 간만시 차이가 있었으나 최종 처리수 $32.9 \sim 51.8$ 로서 $98.1 \sim 97.9\%$ 의 안정적인 처리효율을 나타내었다.

Mode 2의 경우 원수를 다층여과기 통과후 Micro Filter, 역삼투압장치 테스트를 실시하였으며, 운전시 차압은 $0.1 \sim 0.09 \text{ kg/cm}^2$ 로 Mode1과 동일하게 운전되었으며, 처리수질은 전기전도도로 인입 $1,452 \sim 2,080$ 정도로 조수 간만시 차이가 있었으나 최종 처리수 $23.1 \sim 41.9$ 로서 $98.4 \sim 97.9 \%$ 로 안정적인 처리효율을 나타내었다.

Mode 3의 경우는 디스크필터에 의한 전처리 공정으로 운전시 차압은 $0.1 \sim 0.09 \text{ kg/cm}$ 로 Mode 1과 동일하게 나타났다. 처리수질은 전기전도도로 인입 $1,771 \sim 2,554$ 정도로 조수 간만시 차이가 있었으나 처리수 $31.4 \sim 52.8$ 로서 $98.2 \sim 97.9 \%$ 로 안정적인 처리효율을 나타내었다.

Mode 4의 경우는 연수기에 의한 전처리 공정으로 운전시 차압은 $0.1 \sim 0.09 \text{ kg/cm}$ 로 Mode 1 동일 하였으며, 처리수질은 전기전도도로 인입 $1,916 \sim 3,002$ 정도로 조수 간만시 차이가 있었으나 처리수 $31.1 \sim 77.9$ 로서 $96.1 \sim 97.4\%$ 로 나타났으며, 처리 효율은 염화나트륨에 의한 재생 이후 전기전도도 및 염소이온농도가 높게 나타나는 특성이 보였다.

1.3. 전처리 공정 경제성 평가

RO 해수담수화시설에 적합한 전처리 공정을 선택하기 위해 활성탄여과기, 다층여과기, 디스크필터 및 연수기를 평가하였으며, 전기전도도 및 수온 등은 원수와 전처리수 수질 차이는 미비하였다.

탁도 제거율의 경우 Table 12과 같이 원수 수질이 가장 불량한 최대 탁도에서는 활성탄여과기 > 디스크 필터 > 다층여과기 > 연수기 순이었으나, 최소 탁도에서는 활성

탄여과기 > 다층여과기 > 디스크 필터 > 연수기 순으로 나타났다. 활성탄 여과기 제거율은 최대, 최소탁도 제거율이 일정하게 양호하였으나 다층여과기와 디스크 필터의 경우 최대 탁도에서는 디스크 필터가 우수한 반면 미세 물질 함량이 많은 최소 탁도에서는 다층여과기가 우수한 것을 알 수 있었다, 또한 전처리수 평균 SDI₁₅ 값은 Fig. 31 와 같이 활성탄여과기 > 다층여과기 > 연수기 > 디스크 필터 순으로 나타났다. 특히, 디스크필터가 연수기 보다도 전처리 효과가 낮은 것으로 나타났는데, 이는 디스크필터의 Pore Size 20 μm 보다 작은 물질이 다량 통과한 결과로 추정된다.

Table 12. Preconditioning and turbidity removal capacity by reverse osmosis membrane

구 분	전처리공정	전처리수 최대 제거율(%)	전처리수 최소 제거율(%)	전처리수 평균 제거율(%)	전처리수 평균 SDI ₁₅
Mode 1	활성탄여과기	52.4	26.6	20.0	1.05
Mode 2	다층여과기	13.6	12.5	10.5	1.29
Mode 3	디스크필터	16.6	6.6	15.0	2.03
Mode 4	연수기	4.7	6.2	5.6	1.61

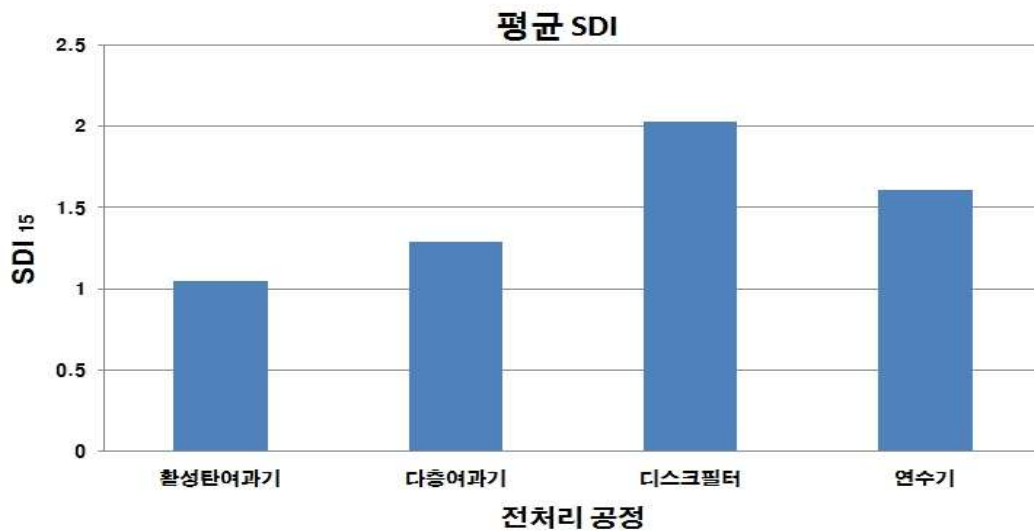


Fig. 31. The average SDI₁₅ of preconditioned water by process

SDI₁₅ 측정은 총 26회중 12회를 간조와 만조시로 나누어 원수와 전처리수를 대상으로 측정하였으며 원수 및 전처리수의 평균 값은 간조시 1.6 : 1.2, 만조시 1.5 : 1.3으로 나타나 SDI 값은 간조와 만조시 크게 변동은 없는 것으로 나타났으나 미소하게 간조시 수질이 악화되는 것으로 나타났다.

유입원수의 SDI₁₅ 값은 0.3~2.8(평균 1.5)로 나타난 반면, 전처리수의 SDI₁₅ 값은 디스크필터 공정을 제외하고는 2.0이하로 전처리 공정의 중요도는 낮게 나타났다. 반면 전처리 없는 RO 담수화 공정 구성을 위해서는 SDI₁₅ 값이 전처리 설비 판단 기준에 따라 2.0 이하여야 하나, 삼양 3수원지의 경우 Fig 32와 같이 원수의 SDI₁₅ 값이 간헐적으로 2.0 이상으로 전처리는 불가피한 것으로 검토 되었다. SDI 최고, 최저 값은 원수의 경우 2.8 : 0.3이 었으며, 처리수는 2.1 : 0.6로 나타났다. 원수 최소 값은 2013.11.15.일 간조시로 나타났으며 전처리수가 원수 보다 오히려 높게 나타났다.

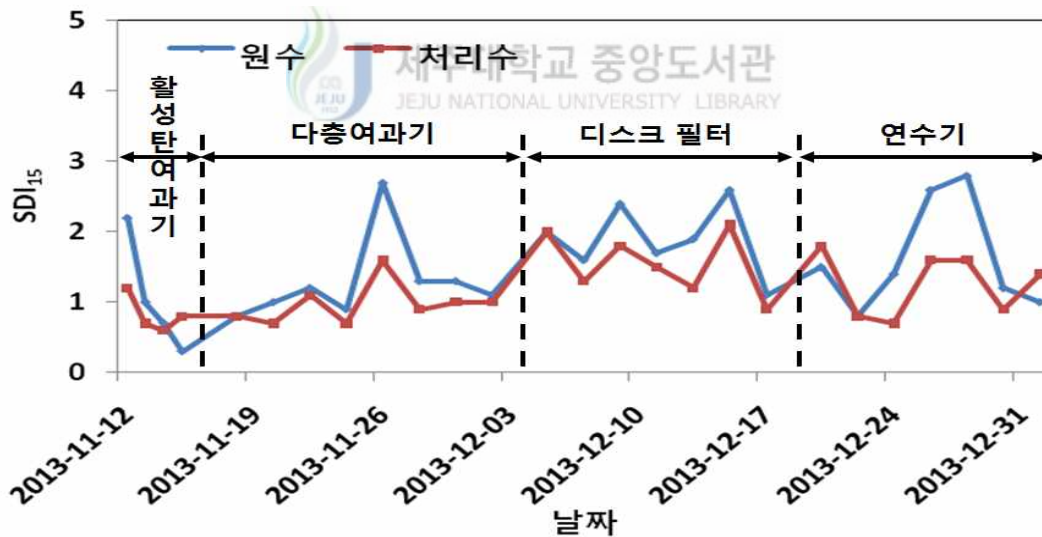


Fig. 32. The changes in SDI₁₅ according to preconditioning

단계별 전처리 설비 운영에 따른 결과를 보면 활성탄여과기의 경우 평균 탁도 제거율 19.5 %, 평균 SDI₁₅ 값은 1.05로 전처리 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 다만 활성탄여

과기의 경우 간헐적으로 부서진 활성탄 입자에 의하여 전처리수가 원수보다 높은 SDI 값을 나타내기도 하였으나 실제 시설에서는 RO 멤브레인 유입전 카트리지가필터에서 여과되어 운영의 안전성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

성능 면에서는 활성탄여과기의 경우 특유의 흡착력으로 색, 맛, 냄새까지도 제거됨으로써 다층여과기보다 효과적인 제거 효율을 가지는 것으로 판단되나, 경제성 면에서는 Table 13 와 같이 장기간 사용후 활성탄의 흡착능력이 기준치이하로 떨어지면 활성탄을 교체하는 등 다층 여과기에 비해 시설비 및 운영관리비는 높은 것으로 나타났다, 또한 디스크 필터의 경우 소형시설을 주문 생산하면서 시설비용이 높게 나타났으나 일반적인 시설에 적용하는 경우에는 시설비는 많이 낮아 질 것으로 나타났다.

이에 따라 RO 담수화시설의 전처리 공정 선택은 원수 수질성상에 따라 신중하게 선택하여야 할 것으로 판단되며, 삼양 3수원지와 같이 원수 수질이 양호한 용천수를 원수로 하는 경우에는 시설비가 가장 저렴하고, 운영관리비가 낮은 다층여과기를 적용하는 것이 경제성 면에서 가장 적합하다고 판단된다.



Table 13. The costs of setting up as well as operating and maintaining preconditioning equipment (50m³/day)

구 분	다층여과기	활성탄여과기	디스크필터	연수기
합 계(원)	490,000	850,000	4,000,000	1,112,000
시설비	490,000	850,000	4,000,000	950,000
운영관리비	-	-	-	162,000

※ 여과재 L 당 원가 : 여과사 112 원, 안트라사이트 595 원, 활성탄 1,032 원

2. 경제성 평가

2.1. 담수화 공정 도입 경제성 분석

2.1.1. 총사업비 및 시설비 분석

삼양 3수원을 원수로 하는 담수화 공정을 도입하고 30년간 운영관리하는 것으로 가정하는 경우 총사업비는 Table 14과 같이 시설용량 4,000 m³/일, 8,000 m³/일 도입에 총사업비는 운영관리비를 포함하여 159억원, 275억원으로 나타났으며, 생산원가는 252.8 원/m³ 및 236.2 원/m³로 분석되었다.

Table 14. The total operating expenses of desalination facilities (during a 30-year period)

구 분	해수담수화 (RO)		비 고
	4,000m ³ /일	8,000m ³ /일	
계획취수량	5,700m ³ /일	11,400m ³ /일	
계획정수량	4,000m ³ /일	8,000m ³ /일	
회수율	70%	70%	
시설비(공사비)	47.9억원	68.4억원	
유지관리비	3.69억 원/년	6.89억 원/년	
총사업비	159억원/30년	275.1억원/30년	
톤당 생산원가	252.8 원/m ³	236.2 원/m ³	

시설비는 Pilot Plant 구성을 기초로 하여 4,000, 8,000 m³/일 규모의 역삼투막 시설에 대해 총사업비 및 유지관리비를 산출한 결과 Table 15~16 와 같이 4,787.3, 6,838.3 백만원으로 산출되었다. 공사비를 공종별로 분석하여 보면 막여과시설은 종합시운전비를 포함하면 67.4%로 가장 높았으며, 그 다음은 토목공사 21.9 %, 건축공사 7.5 % 순으로 산출되었다. 토목 및 건축공사비는 바닷가 인접한 현장 특성을 고려하여 기초공사를 최소화하고 육상에 모든 시설을 두는 것으로 검토하였다.

Table 15. Analysis of the cost of desalination facilities

구 분	공 사 비(백만원)		비 고
	4,000 m ³ /일	8,000 m ³ /일	
□ 총 사업비	4,787.3	6,838.3	
I. 총 공사비	4,237.3	6,052.3	
1. 토목공사	1,050	1,050	
2. 건축공사	360	360	
3. 막여과시설(기계 및 전기시설 등)	2,827.3	4,242.3	
- 종합시운전비	400	400	
II. 설계비	212	302	
II. 감리비	169	242	
III. 기타부대비	169	242	총공사비의 4%

Table 16. Analysis of the cost of desalination facilities by activity

구 분	공 사 비(백만원)		비 고
	4,000 m ³ /일	8,000 m ³ /일	
□ 토목공사	1,050	1,050	
1. 막여과유입수조	840	840	막여과 설비동
2. 약품세정수 이송관로	150	150	D200 mm, L=500 m
3. 농축수 방류관로	60	60	D400 mm, L=150 m
□ 건축공사	360	360	
막여과실, 전기 및 제어실	360	360	
□ 막여과시설 및 기계공사	2,827.3	4,242.3	
1. 설비	866	1,633	
2. 펌프시설	542	735	
3. 약품저장탱크	92.3	92.3	
4. 전기공사	539	705	
5. 설치공사	108	151	
6. 배관 및 설치공	455	678	
7. 기타	225	248	(시운전비 포함)

2.1.2. 유지관리비 분석

유지관리비는 Pilot Plant 운영자료를 근거로 시설용량 4,000 m³/일, 8,000 m³/일로 확대 추진하는 경우 소요되는 연간 유지관리비는 Table 17~18과 같이 각각 369 백만원, 689 백만원으로 분석되었다. 운영관리비를 세부적으로 분석하여 보면 동력비는 전체 운영관리비의 약 47.2 %, 50.3 %로 가장 컸으며 그 다음으로는 멤브레인 필터 교체 등 소모품비 17.6 5 %, 16.9 %, 약품비는 15.1 %, 16.4 %로 순으로 분석되었다.

처리수의 톤당 생산원가는 시설용량 4,000 m³/일, 8,000 m³/일의 경우 각각 252.8 원과 236.2원으로 낮은 염분농도와 양호한 원수 수질이 장점으로 작용하여 운영관리비는 표면해수를 원수로 하는 국내 최대인 부산 기장 해수담수화시설의 톤당 생산원가가 460 원 정도임을 고려할 때 삼양 3수원의 담수화 공정 도입은 경제성이 있는 것으로 분석되었다. (부산시 의회, 2014)



Table 17. The costs of operating and maintaining seawater desalination (4,000 m³/day)

REPLACEMENT CONSUMPTION												
No.	장 치	항 목	단 가	용량/기	연간 사용량	1일 평균사용량	금 액	년간유지비	비 고			
1	SAND FILTER	SAND	800	11,550 L	23,100 L	63.29 L	17,534 원/일	6,400,000 원/년	1년에 1호교체			
2	MICRO FILTER	BAG	50,000	12 EA	144 EA	0.395 EA	19,726 원/일	7,200,000 원/년	1개월에 1호교체			
3	R/O CIP FILTER	BAG	50,000	8 EA	24 EA	0.066 EA	3,288 원/일	1,200,000 원/년	3개월에 1호교체			
4	RO FILTER	MEMBRANE	700,000	216 EA	72 EA	0.197 EA	138,082 원/일	50,400,000 원/년	3년에 1호교체			
소계							178,630 원/일	65,200,000 원/년	교체인건비포함			
POWER CONSUMPTION												
No.	항 목		단 가	단위	운전 대수	실운전 용량	단위	운전 시간	1일 평균 사용량	금 액	년간유지비	비 고
1	원수 FEED 펌프		75	원/kwh	2	139	30 kw	24	667.2	50,040 원/일	18,264,680 원/년	
2	SAND FILTER BACKWASH 펌프		75	원/kwh	1	21.7	45 kw	1	21.7	1,627.5 원/일	594,038 원/년	
3	R/O FEED 펌프		75	원/kwh	1	70.3	82.5 kw	24	1,687.2	126,540 원/일	46,187,100 원/년	
4	R/O H/PRESSURE 펌프		75	원/wh	1	165	250 kw	24	3,960.0	297,000 원/일	108,405,000 원/년	
5	R/O CIP 펌프		75	원/kwh	1	22.9	45 kw	0.5	22.9	858.75 원/일	313,444 원/년	
6	ANTI SCALANT DOSING PUMP		75	원/kwh	1	0.1	0.4 kw	24	4.8	360 원/일	131,400 원/년	
7	SBS DOSING PUMP		75	원/kwh	1	0.1	0.4 kw	24	4.8	360 원/일	131,400 원/년	
소계									476,786 원/일	174,027,062 원/년		
CHEMICAL CONSUMPTION												
No.	항 목		단 가	단위	1일 평균사용량		금 액	년간유지비		비 고		
1	SBS		4,500	원/kg	17.28	kg	32,760 원/일	11,957,400 원/년				
2	ANTI SCALANT		7,000	원/kg	28.80	kg	50,960 원/일	18,600,400 원/년				
3	무기 세정제		7,000	원/kg	10.96	kg	41,720 원/일	15,227,800 원/년				
4	유기 세정제		5,000	원/kg	10.96	kg	29,800 원/일	10,877,000 원/년				
소계							155,240 원/일	56,662,600 원/년				
기 타												
일간 RUNNING COST									810,656 원/일			
년간 RUNNING COST									295,889,662 원/년			
정수이송비									73,142,000 원/년			
합계(년간 유지관리비)									369,031,662 원/년			
생산량준 RUNNING COST		처리수생산량						252.8 원/TON				

Table 18. The costs of operating and maintaining seawater desalination (8,000 m³/day)

REPLACEMENT CONSUMPTION								
No.	장 치	항 목	단 가	금 액	년간유지비	비 고		
1	SAND FILTER	SAND	800	35,068 원/일	12,799,820 원/년	1년에 1호교체		
2	MICRO FILTER	BAG	50,000	39,452 원/일	14,400,000 원/년	1개월에 1호교체		
3	R/O CIP FILTER	BAG	50,000	6,575 원/일	2,400,000 원/년	3개월에 1호 CIP2회		
4	RO FILTER	MEMBRANE	700,000	276,164 원/일	100,800,000 원/년	3년에 1호교체		
소계				357,259 원/일	117,600,000 원/년	교체인건비포함		
POWER CONSUMPTION								
No.	항 목	단 가	단 위	1일 평균사용량	금 액	년간유지비	비 고	
1	원수 FEED 펌프	75	원/kwh	1,334.4kw	100,080 원/일	36,529,200 원/년		
2	SAND FILTER BACKWASH 펌프	75	원/kwh	43.3 kw	3,249 원/일	1,185,885 원/년		
3	R/O FEED 펌프	75	원/kwh	3,374.4kw	253,080 원/일	92,374,200 원/년		
3	R/O H/PRESSURE 펌프	75	원/kwh	7,920.0kw	594,000 원/일	216,810,000 원/년		
4	R/O CIP 펌프	75	원/kwh	22.9kw	1,720 원/일	627,709 원/년		
5	ANTI SCALANT DOSING PUMP	75	원/kwh	4.8kw	360 원/일	131,400 원/년		
6	SBS DOSING PUMP	75	원/kwh	4.8kw	360 원/일	131,400 원/년		
소계					952,849 원/일	347,789,794 원/년		
CHEMICAL CONSUMPTION								
No.	항 목	단 가	단 위	비중	1일 평균사용량	금 액	년간유지비	비 고
1	SBS	4,500	원/kg	1.1	34.56 kg	65,520 원/일	23,914,800 원/년	
2	ANTI SCALANT	7,000	원/kg	1.1	57.60 kg	101,920 원/일	37,200,800 원/년	
3	무기 세정제	7,000	원/kg	-	21.92 kg	83,440 원/일	30,455,600 원/년	
4	유기 세정제	5,000	원/kg	-	21.92 kg	59,600 원/일	21,754,000 원/년	
소계						310,480 원/일	113,325,200 원/년	
기 타								
일간 RUNNING COST							1,620,588 원/일	
년간 RUNNING COST							578,714,994 원/일	
정수이송비							110,884,000 원/년	
합계(년간 유지관리비)							689,598,000 원/년	
생산량준 RUNNING COST		처리수생산량					236.2 원/TON	

2.2. 지하수 개발 경제성 분석

2.2.1. 총사업비 및 시설비 분석

삼양 3수원을 원수로 하는 담수화 공정을 도입하는 경우 경제성 있는 것으로 분석됨에 따라 대체 취수원으로 지하수 개발방안에 대하여 경제성을 비교 분석하고자 하였다. 지하수를 개발하는 경우에는 Table 19과 같이 1공당 취수량을 1,000 m³/일로 가정하여 시설용량 8,000 m³/일을 개발하는 경우와 인근 지하수 취수량을 고려하여 1공당 취수량을 600 ~ 800 m³/일로 적용하는 경우 각각 비교 분석 하였다.

총사업비는 1공당 취수량을 1,000 m³/일로 지정하는 경우 시설비와 30년간의 운영관리비를 합쳐 213억 원인 반면, 1공당 600 ~ 800 m³/일로 취수하는 경우를 가정하는 경우 지하수 공수가 12공, 269억 원으로 증가하는 것을 알 수 있었다.

Table 19. The total operating expenses of the underground water development project (during a 30-year period)

구 분	1공당 1,000 m ³ /일 취수		1공당 600~800 m ³ /일 취수	
	4,000 m ³ /일	8,000 m ³ /일	4,000 m ³ /일	8,000 m ³ /일
계획취수량	4,000 m ³ /일	8,000 m ³ /일	4,000 m ³ /일	8,000 m ³ /일
계획정수량	1,000 m ³ /일 x 4공	1,000 m ³ /일 x 8공	800 m ³ /일 x 5공	800 m ³ /일 x 5공 600 m ³ /일 x 7공
관정 공수	도련 4공	도련 4공, 교래지구 4공	도련 5공	총 12공 (도련 5공, 교래 7공)
시설비(공사비)	33.6억 원	82.5억 원	38.8 억 원	117.25 억 원
유지관리비	2.18억 원/년	4.36억 원/년	2.54 억 원/년	5.08 억 원/년
총사업비	99억 원/30년	213.3억 원/30년	115 억 원/30년	269 억 원/30년
톤당 생산원가	149.3 원/톤		174.2 원/톤	

사업비는 지하수 관정 개발 위치에 따라 1공당 소요사업비가 달라지는데 1공당 취수량을 1,000 m³/일 으로 추정하면 4,000 m³/일, 8,000 m³/일의 경우 3,364 백만원, 8,248 백만원, 1공당 취수량을 600~800 m³/일 으로 추정하는 경우 3,883 백만원, 11,725 백만원

으로 각각 산출되었다.

시설공사비, 용역비 및 용지비 등 상세 사업비 현황은 Table 20~22과 같이 총사업비에서 관정 굴착 등 시설공사비는 지역의 해발 높이에 따라 차등 산정하였으며, 관정수는 1공당 취수량에 따라 최소 8공, 최대 12공으로 가정하여 평가 하였다.

시설관로의 관경을 도련정수장 인근에 굴착하는 경우에는 기존 도수관로와 1km 이내로 위치시키는 것으로 하여 100 mm로 하였으나, 교래지역의 경우는 메인 도수관로 및 관정별 개별 관로를 일정구간 신설관로로 이송 후 기존관로에 연결하여 이용하는 것으로 가정하여 관로 D 300mm 연장 약 15 km 따른 약 35억 원의 사업비는 제외하고 검토하였다.

Table 20. Analysis of the cost of underground water development facilities

(단위 : 백만원)

구 분	1공당 1,000 m ³ /일 취수		1공당 600~800 m ³ /일 취수		비고
	4,000m ³ /일 (4공)	8,000m ³ /일 (4공)	4,000m ³ /일 (5공)	8,000m ³ /일 (7공)	
□ 총사업비	3,363.5	8,248.1	3,882.5	11,724.9	
I. 총 공 사 비	2,974.5	7,299.1	3,436.5	10,375.9	
1. 관정공사 외 용지비	2,974.5	7,299.1	3,436.5	10,375.9	
II. 설 계 비	150	365	172	519	총공사비의 5%
II. 감 리 비	120	292	137	415	총공사비의 4%
III. 기타부대비	119	292	137	415	총공사비의 4%

Table Development of Doryeon underground water (at an altitude of about 110 m)

(단위 : 백만원)

공 종	단 위	1공당 1,000 m ³ /일 취수		1공당 600~800 m ³ /일 취수		비 고
		수량(4공)	사업비	수량(5공)	사업비	
1. 관정공사			1,438.4		1,798.45	
1)시추공사	공	4	950.4	5	1,188.45	
2)지하수 영향조사	공	4	80	5	100	
3)양수시설	식	4	240	5	300	
4)전기시설 제어반	식	4	60	5	75	
5)양수장옥, 보호공	식	4	108	5	135	
2. 관로공사			366.1		458.05	
1)∅300mm	m	-		-		
2)∅100mm	m	935	271.2	1,170	339.3	
3)기타	식	1	94.9	1	118.75	공사비의 35%
3. 부대시설	식	4	40	5	50	부대전기시설
4 용지 및 지장물 보상	식	1	1,130	1	1,130	
합 계			2,974.5		3,436.5	

Table 22. Development of Gyorae underground water (at an altitude of about 410 m)

(단위 : 백만원)

공 종	단위	1공당 1,000 m ³ /일 취수		1공당 600~800 m ³ /일 취수		비 고
		수 량	사업비	수 량	사업비	
1. 관정공사			3,254		5,694.5	
1)시추공사	공	4	2,766	7	4,840.5	
2)지하수 영향조사	공	4	80	7	140	
3)양수시설	식	4	240	7	420	
4)전기시설 제어반	식	4	60	7	105	
5)양수장옥, 보호공	식	4	108	7	189	
2. 관로공사			785.1		910.4	
1)∅300mm	m	920	349.6	920	349.6	
2)∅100mm	m	800	232	1,120	324.8	
3)기타	식	1	203.5	1	236.04	공사비의 35%
3. 부대시설	식	4	40	7	70	부대전기시설
4 용지 및 지장물보상	식	1	264.5	1	264.5	
합 계			4,324.6		6,939.4	

2.2.2. 유지관리비 분석

지하수 개발에 따른 유지관리비는 Table 23과 같이 1공당 취수량을 1,000 m³/일의 경우 4,000 m³/일 기준시 218백 만원/년(8,000 m³/일 기준시 436백 만원/년)으로 톤당 149원이고, 1공당 취수량을 600~800 m³/일 으로 가정하는 경우는 4,000m³/일 기준시 254백 만원/년(8,000 m³/일 기준시 508백 만원/년)으로 m³당 174원으로 분석되었다.

Table 23. Analysis of the costs of developing as well as operating and maintaining underground water

(단위 : 백만원/년)

공 종	1공당 1,000 m ³ /일 취수		1공당 600~800 m ³ /일 취수		비 고
	4,000 m ³ /일 (도련4공)	8,000 m ³ /일 (도련4공+교래 4공)	4,000 m ³ /일 (도련 5공)	8,000 m ³ /일 (도련5공+교래 7공)	
1. 유지보수비	145.04	290.08	181.3	362.6	
1)전력비용	134.84	269.68	168.55	337.1	
2)유지보수비용	10.2	20.4	12.75	25.5	
2. 약품비 등	73.0	146	73.0	146.0	
합 계	218.04	436.08	254.3	508.6	
생산원가	149.3 원/톤		174.2 원/톤		

2.3. 담수화 공정 도입 타당성 평가

경제적 타당성 분석은 일반적으로 편익/비용 비율(B/C; Benefit Cost Ratio)에 의한 방식과 순현재가치(NPV; Net Present Value) 추정 방식이 적용되며, 편익/비용 비율의 경우 편익/비용 비율 ≥ 1 인 경우 경제성 있음, 순현재가치 추정의 경우는 사업에 수반된 모든 비용과 편익을 기준년의 현재가치로 할인하여 총 편익에서 총비용을 제한 값이며 순현재가치 ≥ 0 이면 경제성이 있는 것으로 판단 한다.

편익 추정은 제주특별자치도 수자원본부에서 조사된 『지하수요금 현실화계획, 2011년』에 따라 259.4 원/m³을 적용하였으며, 막여과 정수처리시설의 분석기간은 건설완공 후 30년으로 설정, 적용할인율은 KDI의 예비타당성 수행을 위한 일반지침에 따라 할인율 5.5 % 적용, 내용연수는 15년 후 기계 및 전기 설비를 재투자 하는 것으로 고려하여 분석하였다.

경제적 편익에서는 지하수로 상수도를 공급하는 경우를 가정하여 초기투자 및 시설 노후시 개량을 가정하여 15년차에 재투자하는 것으로 추정하였으며, 지하수 공수 결정은 개발지역의 고도차에 따라 1공당 취수 가능량이 달라졌다. 현재 운영중인 지하수의 경우 표고가 약 105~120 m의 경우에는 1공당 1,000 m³/d, 표고가 약 300 m의 경우에는 600 m³/d 이 취수되는 것으로 조사되어 취수량의 결정변수는 표고에 좌우됨을 알 수 있었다.

2.3.1. 경제성 분석 결과

담수화 공정 도입에 따른 경제성을 분석한 결과 Table 24와 같이 지하수 관정 개발 위치가 해발 110 m 인근인 경우에는 8공으로 8,000 m³/일을 취수 가능하여 담수화 공정 도입보다 경제적 편익이 경제적 비용을 초과하여 BC Ratio가 0.98로 1보다 작고, NPV - 233 백만원으로 분석되어 BC Ratio가 0.98로 다소 분리하였다.

반면 지하수 관정 개발 위치가 해발 410 m 인근인 경우에는 8,000 m³/일 취수에 12공이 필요하여 경제적 편익이 경제적 비용을 초과하여 BC Ratio가 1.03로 1보다 크고, NPV + 290 백만원으로 분석되어 담수화 공정 도입 추진은 경제적 타당성이 있는 것으로 나타났다. 특히 현재의 지하수 개발 억제 정책을 고려하고, 가뭄시 지하수

수위 저하 등을 고려할 때 버려지는 용천수를 활용하는 담수화 공정 도입은 중장기적으로 필요한 것으로 도출되었다.

경제적 편익과 비용에 대하여 추정된 결과는 Table 25과 같이 지하수 취수량을 1공당 1,000 m³/일 로 가정한 경우 경제적 편익은 10,966 백만원, 경제적비용 11,198 백만원 있으며, 취수량을 1공당 600~800 m³/일 로 가정한 경우는 Table 26과 같이 경우 경제적 편익은 11,488 백만원, 경제적비용 11,198 백만원으로 분석되었다.

Table 24. The findings of analyzing the economical feasibility of introducing seawater desalination

(단위 : 백만원)

구 분	지하수 8공 비교 (도련4공 + 교래4공)	지하수 12공 비교 (도련5공 + 교래7공)	비 고
경제적편익	10,966	11,488	
경제적비용	11,198	11,198	
BC Ratio	0.98	1.03	
NPV	-233	290	

Table 25. Economic benefits and results of estimating expenses (Doryeon 4gong
+ Gyorae 4gong Development)

(단위: 백만원)

년도	경제적편익	경제적비용		경제적편익-경제적비용
	편익	공사비	운영비	
초기년도	3,360	4,787		-1,427
1년	359		350	9
2년	340		332	9
3년	323		314	8
4년	306		298	8
5년	290		282	7
6년	275		268	7
7년	260		254	7
8년	247		240	6
9년	234		228	6
10년	222		216	6
11년	210		205	5
12년	199		194	5
13년	189		184	5
14년	179		174	5
15년	2,271		1,213	1,058
16년	161		157	4
17년	152		149	4
18년	144		141	4
19년	137		133	4
20년	130		126	3
21년	123		120	3
22년	117		114	3
23년	111		108	3
24년	105		102	3
25년	99		97	3
26년	94		92	2
27년	89		87	2
28년	85		82	2
29년	80		78	2
30년	76		74	2
계	10,966		11,198	-233

Table 26. Economic benefits and results of estimating expenses (Doryeon 5gong + Gyorae 7gong Development)

(단위: 백만원)

년도	경제적편익	경제적비용		경제적편익-경제적비용
	편익	공사비	운영비	
초기년도	3,882	4,787		-1,427
1년	359		350	9
2년	340		332	9
3년	323		314	8
4년	306		298	8
5년	290		282	7
6년	275		268	7
7년	260		254	7
8년	247		240	6
9년	234		228	6
10년	222		216	6
11년	210		205	5
12년	199		194	5
13년	189		184	5
14년	179		174	5
15년	2,271		1,213	1,058
16년	161		157	4
17년	152		149	4
18년	144		141	4
19년	137		133	4
20년	130		126	3
21년	123		120	3
22년	117		114	3
23년	111		108	3
24년	105		102	3
25년	99		97	3
26년	94		92	2
27년	89		87	2
28년	85		82	2
29년	80		78	2
30년	76		74	2
계	11,488		11,198	290

V. 결 론

1일 50톤의 소형 파일럿 플랜트를 운영하여 설계인자 도출 및 최적의 전처리 공정 도입을 꾀한 결과 원수의 수질 변화에 안정적으로 대응하고, 용천수량 변화를 고려하면 시설용량은 20,000 m³/d보다 작은 8,000 m³/d을 적용하는 것으로 하고 1, 2단계로 나누어 사업을 추진하는 것이 필요하였다.

담수화 공정 구성은 용천수의 양호한 수질에도 불구하고 원수 SDI₁₅ 값이 간헐적으로 2 이상이 되어 전처리 공정도입이 필요하였으며,, 전처리 공정은 활성탄여과기, 다층여과기, 디스크필터, 연수기를 적용하여 처리 성능 및 역삼투막에 미치는 영향 등을 분석한 결과 처리효율은 활성탄여과기가 가장 우수하게 나타났으나, 시설비 및 유지관리비 등을 종합적으로 분석한 결과 다층여과기(안트라사이트 + 모래) 적용이 가장 경제적인 것으로 평가 되었다.

또한, 1일 8,000 m³ 담수화 공정 도입에 따른 타당성을 분석한 결과 지하수 개발 위치가 해발 100 m 인근에서는 1공당 취수량이 1,000 m³/일을 초과하여 8공으로 충분하여 경제적 비용이 경제적 편익을 초과하여 BC Ratio가 0.98로 1보다 작고, NPV - 233 백만원으로 지하수 개발이 유리한 것으로 분석되었다, 반면 개발 위치가 해발 300 m이상의 경우 1공당 취수량이 600~800 m³/일 정도로 감소되어 관정수는 12 공으로 증가하고 경제적 편익이 경제적 비용을 초과하여 BC Ratio가 1.03로 1보다 크고, NPV +290 백만원으로 담수화 공정 도입이 타당한 것으로 분석되었다.

특히, 현재의 지하수 개발 억제 정책을 고려하고, 가뭄시 지하수 수위 저하 등을 고려할 때 삼양 3수원을 활용하는 담수화 공정 도입은 충분히 타당성이 있는 것으로 도출됨에 따라 중장기적인 계획에 의거하여 용수 공급 시설을 도입하여 구 제주 시 동부지역의 용수 수요에 안정적으로 대처하는 것이 필요하다. 또한 경제성 분석 결과 원수 수질은 안정적이며 변화가 작아 생산원가는 낮은 반면, 최종 처리수 수질은 매우 안전한 것으로 도출되었다.

VI. 참고문헌

1. 삼양 3수원의 수리지질조사 연구, 연세대학교(2007).
2. 삼양 3수원의 염소이온 상승 원인에 대한 연구, 연세대학교(1997).
3. 강준원, 구자용, 최승일, 정재춘, 육운수, 오준을 이용한 수처리기술, 동화기술(2002).
4. 강용태, 덕산정수장 고도정수처리시설 타당성 조사 및 기본계획보고서, 부산광역시 상수도사업본부(1996).
5. 김용관, 활성탄 수처리 기술과 원리, 신광문화사(1995).
6. 김승현, 윤종섭, 이석현, “여재종류에 따른 역삼투법 해수담수화 시설 전처리 여과공정의 성능비교,” 상하수도학회지, **23**(2), 215~222(2009).
7. 김지훈, “역삼투압 막여과공정에서 물리·화학적 세정기법 연구”(2010).
8. 물 환경종합평가방법개발조사연구(Ⅲ) 최종보고서, 환경부, pp. 223~228(2006).
9. 박정규, 권영두, 서유덕, 신석봉, 최신수질관리, 동화기술(2010).
10. 박준영, “역삼투막을 이용한 해수담수화 공정에서 삼투역세정의 조건별 영향평가”(2012).
11. 수질측정망 운영 계획, 환경부(2011).
12. 수질오염공정시험법, 환경부(2010).
13. 수질 및 수생태계 보전에 관한 시행규칙, 환경부(2011).
14. 유호식, “한강 수질의 월 변동성에 관한 연구,” 한국물환경학회지, pp.352~356(2004).
15. 이달성, CVS를 위한 가치창조경영(2004)
16. 이상은, 정수처리기술의 현황과 발전, 한국환경기술진흥원 Newsletter 25호(2002).
17. 막여과 담수화연구센터(알오플랜트) 홈페이지, www.roplant.or.kr
18. The 2003 IDA worldwide desalination plants inventory report, IDA(International Desalination Association)
19. Tamin, Y., Kimberly E. T., “Overview of desalination techniques,” UCWR Issue, **132**, 3~10(2005).

20. Helal, A. M., EL-nashar, A. M., E. Al-Katheeri, A., Al-Malek, "Optimal design of hybrid RO/MSF desalination plants part 1 : Modeling and Algorithms," *Desalination*, **154**, 43~66(2003).
21. Amirtharajah, A., "The interface between filtration and backwashing," *Wat.Res.*, **19**(5), 581~588(1985).
22. Abdessemed, D., Nezzal, G., Aim R. B., "Coagulation-adsorption-ultrafiltration for wastewater treatment and reuse," *Desalination*, **131**, 307~314(2000).
23. The status of direct filtration, AWWA Filtration Research Committee, *J. AWWA*, **76**, 405~411(1980).
24. Blatt, W. F., "1970 Membrane Science and Technology." Plenum Press.
25. Boerlage S. F. E., Kennedy M., Aniyee M. P., Schippers J. C., "Applications of the MFI-UF to measure and predict particulate fouling in RO systems," *J. Membrane Science*, **220**, 97~116(2003).
26. Bowen W. R., Jenner F., "Theoretical descriptions of membrane filtration of colloids and fine particles: An assessment and review," *Advances in Colloid and Interface Science*, **56**, 141~200(1995).
27. Cleasby, J. L., "Filtration, in water quality and treatment," *a handbook of community water supplies*, F.W. pontius(ed.), AWWA, Denver(1990).
28. Cleasby, J. L., "1990b. Direct filtration of surface water, in proceeding of the international conference on water and wastewater," Academic periodical press, Beijing, China, July 11~15(1989).
29. Ebrahim S. H., Abdel-Jawad M. M., Safar M., "Conventional pretreatment system for the Doha Reverse Osmosis Plant_Technical and economic assessment," *Desalination*, **102**, 179~187(1995).

30. Elguera A. M. and Perez Beaz S. O., "Development of the most adequate pre-treatment for high capacity seawater desalination plants with open intake," *Desalination*, **184**, 173~183(2005).
31. Fritzmann C., Lowenberg J., Wintgens T., Melin T., "State-of-the-art of reverse osmosis desalination," *Desalination*, **216**, 1~76(2007).
32. Graham, N. J. D., Brandao, C. C. S., Luckham, P. F., "Evaluating the removal of color from water using direct filtration and dual coagulants," *J. AWWA*, **84**(5), 105~113(1992).
33. Harrelkas F., Azizi A., Yaacoubi A., Benhammou A., Pons M. N., "Treatment of textile dye effluents using coagulation - flocculation coupled with membrane processes or adsorption on powdered activated carbon," *Desalination*, **235**, 330~339(2009).
34. Isaias N. P., "Experience in reverse osmosis pretreatment," *Desalination*, **139**, 57~64(2001).
35. Mitrouli S. T., Yiantsios S. G., Karabelas A. J., Mitrakas M., Follesdal M., Kjolseth P. A., "Pretreatment for desalination of seawater from an open intake by dual-media filtration_Pilot testing and comparison of two different media," *Desalination*, **222**, 24~37(2008).
36. Morrow, J. J., Rausch, E. G., "Colloid desabilization with cationic polyelectrolytes as affected by velocity gradients," *J. AWWA*, **66**(11), 646(1974).
37. Teuler A., Glucma K., Lain J.M, "Assessment of UF pretreatment prior RO membranes for seawater desalination," *Desalination*, **125**, 89~96(1999).

감사의 글

직장생활 16년 차에 시작한 산업대학원 생활 2년 반을 마무리 하고자 짧은 지식으로 석사학위 논문을 쓰게 됨을 송구스럽지만 기쁘게 생각하며, 도움을 주신 많은 분들에게 감사를 드립니다.

특히, 바쁘신 와중에도 씨앗에서 논문이라는 싹이 나와 나무가 될 수 있도록 아낌없는 도움을 주신 김진근 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 논문의 줄기를 뺏어 성장 할 수 있게 심사하여 주신 감상규 교수님, 조은일 교수님 그리고 논문의 뿌리가 될 수 있도록 학위과정 동안 많은 가르침을 주신 허목 교수님, 허철구 교수님 그리고 이기호 교수님께도 감사드립니다. 또한, 바쁜 학과사무실 업무에도 불구하고 논문 마무리에 기꺼이 도와준 환경공학과 조교들에게도 “고맙다”는 말을 전합니다.

바쁘다는 핑계로 가족과 함께 많이 놀아주지 못해 미안하다는 말과 자기 할 일을 스스로 할 줄 알며 음악을 사랑하는 첫째 승현, 웃음과 행복을 알게 해주는 둘째 동현이에게 많이 사랑하고 고맙다는 말을 전한다. 또한, 새벽부터 저녁까지 가족을 위해 헌신하며 힘들지만 웃음을 잃지 않는 사랑하는 아내 권현숙님에게도 감사하고 사랑한다는 말을 전합니다.

상수도에 대한 열정에서 시작한 산업대학원에서 물에 대하여 깊이 생각하는 기회가 되었다, 물 산업 전문가라는 작은 꿈과 열정은 가슴 깊은 곳에 간직하며 또 다른 학업의 기회가 생긴다면 더 열심히 더 많은 것을 탐구 하고 싶다는 생각을 했다. 그때까지 열정이 남아 있기를 희망해본다.

2014년 12월

김 우 찬