

용수 사용량 절감 및 폐수 재활용 방안(2)



전 병준
(주)한수 기술부 부장 대행

II. 물에 의한 장애의 기초적 이해

1. 물에 기인한 장애

물을 이용하여 플랜트를 가동하는 공장이나 기타 부분에서 물에 용존된 각종염류나 이온들에 의하여 장애를 초래할 수 있다.

이러한 장애는 통상 부식, 스케일, 슬라임 등에 의한 것으로 제품불량, 시설악화, 효율저하 등 설비의 정상적인 운전을 방해하게 된다.

2. 장애의 세부고찰

1) 부식장애

금속재질을 사용하는 설비에서 가장 흔한 장애는 부식으로서 탄소강 재질에서는 비교적 단시간에 진행된다. 부식은 물과 용존산소의 영향에 의하여 발생되며 염소이온과 같은 부식성이온이나 오염물의 부착 등에 의하여 부식속도가 증가하게 된다.

또한 제반조건(pH, 온도등)에 의해서도 영향을 받으며, 설비의 직접적 파손의 원인이 된다.

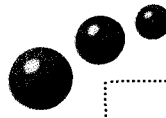
이러한 부식을 방지하기 위해서는 통상 인산염계의 부식방지제를 적용하여, 금속표면에 피막을 형성시키는 방법이 채택되고 있으며, 보일러 시스템과 같은 압력용기에서는 탈기처리를 실시함으로써 부식의 원인물질이 되는 용존산소나, 탄산가스 등을 제거하는 방법을 채택하고 있다.

2) 스케일 장애

보일러시스템이나 냉각시스템과

[표 2-1. 수중에 존재하는 보통의 불순물]

성분	화학적식	기인한장애	대책
탁도	Kaoline degree, ppm으로 표시	· 탁액형성, Valve의 조작 저해	응집침전, 여과처리
색	색도로 표시	· 침전물과 결합후 착색형성	응집침전, 활성탄 흡착처리
경도	Ca-H, Mg-H, CaCO ₃ ppm로 표시	· 열교환기, 보일러 등에 스케일 형성	양이온 교환처리 적절한 수처리
알칼리도	HCO ₃ , CO ₃ , OH, CaCO ₃ ppm로 표시	· Ca와 결합 Scale형성 · 증기중의 CO ₂ 로 부식유발	탈기처리, 음이온 교환 처리
탄산가스	CO ₂	· 증기관의 부식, pH 저하	알칼리 중화, 탈기처리
pH	수소이온농도	· pH가 높을 경우 Scale 증가 · 낮을 경우 부식도 증가	적정 pH 유지
황산염	SO ₄ ²⁻	· Ca와 결합하여 Scale 형성 · 부식성 이온	탈염·증류
염화물	Cl ⁻	· 물의 부식성을 증가시키는 요인	탈염·증류
질산염	NO ₃ ⁻	· 고농도의 경우 유아에게 Methemoglo binemia의 원인	탈염·증류
불소	F ⁻	· 수중 존재가능성이 낮음 · 강한 부식성	응집침전 처리 등
실리카	SiO ₂	· 스케일 형성	음이온 교환처리
철	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	· 색도 형성, 부식재유발	양이온교환, 흡착처리
산소	O ₂	· 부식의 직접적 원인	탈기처리, 부식억제제 사용
황화수소	H ₂ S	· 악취 유발	폭기, 염소처리, 음이온교환처리
암모니아	NH ₃	· 동재질의 부식 · 염소살균제의 효과 저하	Strainer 처리, 여과, 흡착
도전율	비전도로로 표시	· 염류 양의 간접표시로서 다량의 경우 Foaming 등 유발	탈염·증류 등
현탁고체	SS 측정후 ppm으로 표시	· 열교환기 침적 · 전열장애등	응집, 침전처리, 여과, 흡착



같은 열교환이 일어나는 부분에서는 전술한 바와 같이 수중에 존재하는 경도성분이 온도가 상승함에 따라 용해도가 감소하여(일반적인 물질과는 상반된 용해도) 가온부위에서 경도성분이 석출되어 스케일로 고착화된다. 이러한 스케일은 전열효율의 저하는 물론 과열 될 경우에는 모재의 Crack(균열)이나 직접적 파손의 원인이 되기도 한다

따라서 이러한 스케일을 방지하기 위하여 통상 보일러 용수 처리시에는 이온교환수지를 이용한 순수나 연수를 만드는 이온교환처리가 일반화되어 있다.

아울러 냉각용수로써는 스케일을 방지하기 위한 Synthetic dispersant를 채용하는 것이 일반적이다.

3) 슬라임 장해

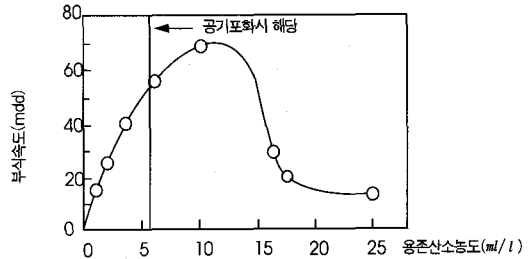
물속에 존재하는 각종 염류와 함께 영양원이 될 수 있는 유기물이 존재할 경우에는 조류나 이끼류(Fungi, Algae)와 같은 미생물의 증식이 발생하게 된다. 이러한 미생물의 증식은 세균 등과 함께 통상 공존하므로 부패의 원인이 되거나 설비의 2차 부식 등을 야기시키게 된다.

따라서 슬라임 미생물 장해를 방지하기 위해서 살균처리를 실시하게 되며, 살균제로는 염소계(NaOCl, ClO₂, Cl₂, Gas)나 과산화물계(O₃, H₂O₂ 등)가 적용되고 있다.

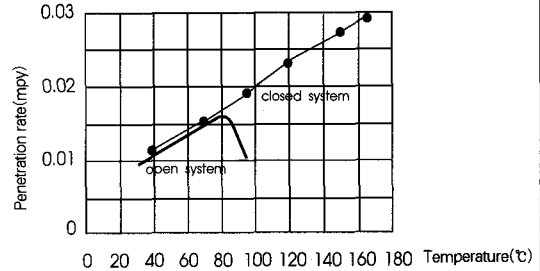
한편, 음용수 용도로 과거에는 염소계 소독제(Cl₂, Gas, NaOCl)가 사용되어 왔으나, 발암성 물질형성(THM=Tri-Halo-Methane) 논란이후 ClO₂계의 적용이 확산된 추세이며, 이들 염소계 소독제의 살균능력은 잔류염소(Residual-Chlorine)의 함량으로서 구분하는 것이 통례이다.

이들 염소계 소독제는 안정성이 다소 낮은 특징이 있으나 낮은 농도로도 가장 즉각적인 살균력이 있어 용폐수계의 살균제로 보편화 되어 있으며, 잔류독성이 있는

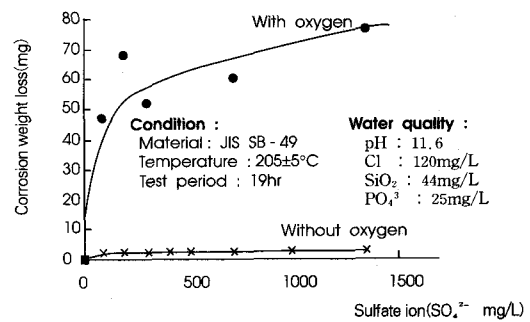
[그림 2-1. 용존산소와 탄소강의 부식도]



[그림 2-2. 탄소강의 부식도와 온도 관계]

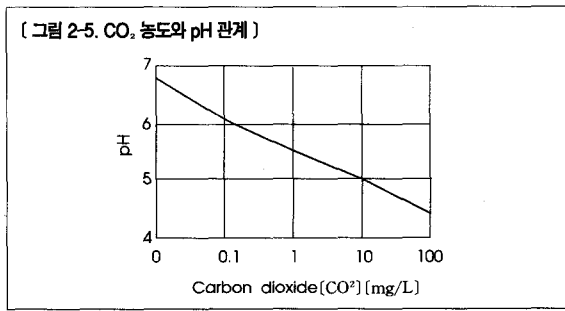
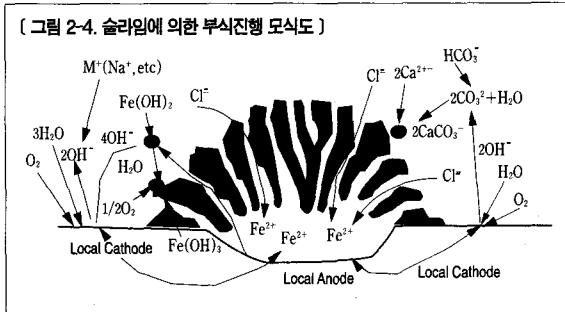


[그림 2-3. 부식성이온(SO₄²⁻)과 부식도 관계]



[표 2-2. 주요 스케일 성분의 열전도율]

물 질 명	열전도율(kw/m·h°C)
실리카(SiO ₂) 주체의 스케일	0.2~0.4
탄산염(CaCO ₃) 주체의 스케일	0.4~0.6
황산염(CaSO ₄) 주체의 스케일	0.6~2.0
탄 소 강	40~60
銅(구리-Copper)	320~360
주 석	0.06~0.1
유 지 분	0.1



이 소시아졸린계 (-SCN계) 살균제나 NaBr계, Glutaldehyde계, 4급 암모늄염(계면활성제)계 등의 약제도 냉각수처리 등의 특수용도에 적용되고 있다.

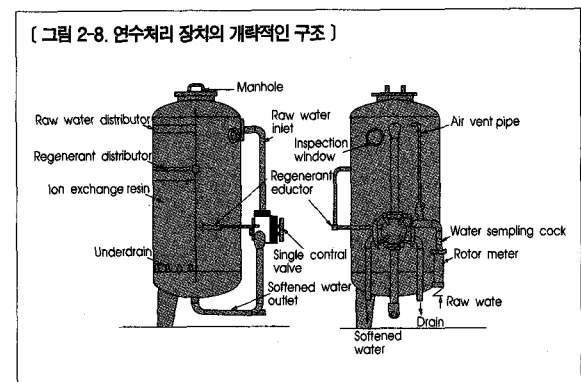
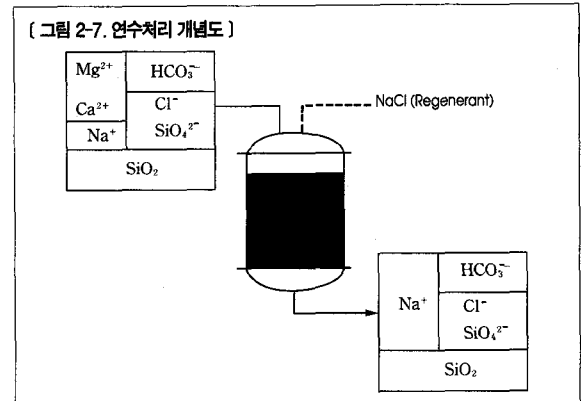
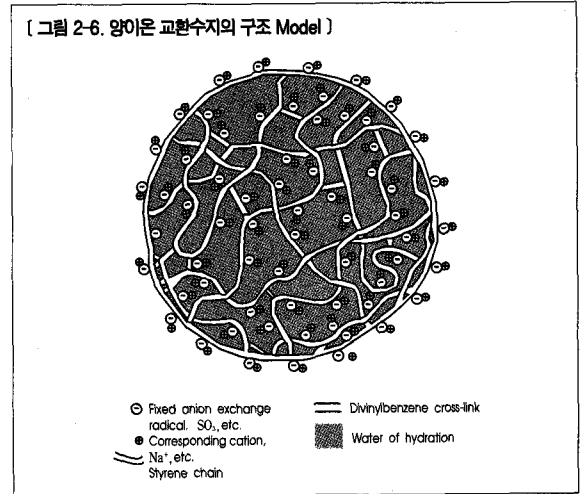
3. 장애방지 기초론

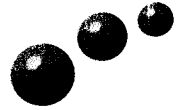
물에 기인한 각종 장애를 방지하기 위해서는 용수의 사용목적에 적합한 처리방법을 채택하여야 하며, 이와 함께 처리방법의 경제성 역시 고려되어야 한다.

용수처리 분야에서 가장 많이 채택되고 있는 전처리 방법으로는 현탁성 물질을 제거하기 위한 응집침전과 Sand Filter처리, 보일러의 용수처리 단계에서 스케일 원인 물질을 제거하기 위한 Ion exchanger 처리, 급수 계통의 부식을 방지하기 위한 인산염계 부식방지제의 적용 등이 있다.

응집침전과 Sand-Filter는 이온성 물질이나 용존유기물의 제거가 어렵기 때문에 통상 용수의 사용목적에 따라 2차 처리를 실시하는 것이 일반적이며,

R/O(Reverse Osmosis) 처리수의 경우에는 처리수질이 순수와 같은 상태이므로 직접 순수로 사용하는 경우





도 있다.

Ⅲ. 용수 절감을 위한 기본 방안

1. 운전방법의 최적화를 통한 용수절감

공업용수의 사용량이 큰 공장의 경우 가장 주요한 용수의 사용처는 냉각용수이며, 냉각용수의 사용량 절감은 용수량의 절대적 감소를 좌우할 수 있는 인자가 된다.

국내의 산업체 냉각용수는 대부분 농축운전을 실시하는 순환 냉각방식을 채택하며, 보급수로는 하천수와 상

[표 2-4. 용수처리용 각종 살균제의 종류와 특징]

종 류	화 학 식	잔류염소함량(%)	비 고
액화염소	Cl ₂	100	고압가스 설비 필요 가장 경제적
차이염소산나트륨	NaOCl	8~10	액체형태로 취급용이
이산화염소	ClO ₂	5~8	THA형성이 없음. 안정성이 다소 낮음.
과산화수소	H ₂ O ₂	10~30(as H ₂ O ₂)	고 가
오존	O ₃	-	오존발생장치 필요 소규모처리에 아용
차이염소산칼슘	Ca(OCl) ₂	60~70	고체(Tablet) 형태로 취급이 간편

[표 2-3. 각종 이온교환수지의 종류와 특성]

구 분	Cation exchange resin		Anion exchange resin	
	Strong acid	Weak acid	Strong basic	Weak basic
항 목				
Structural formula	$\begin{array}{c} \text{-CH-CH}_2\text{-CH-CH}_2\text{-} \\ \quad \\ \text{SO}_2\text{Na} \quad \text{SO}_2\text{Na} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{-CH-CH}_2\text{-CH-CH}_2\text{-} \\ \quad \\ \text{COOH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{-CH-CH}_2\text{-CH-CH}_2\text{-CH-CH}_2\text{-} \\ \quad \quad \quad \\ \text{CH}_2\text{N(CH}_2\text{)}_3\text{Cl} \quad \text{CH}_2\text{N(CH}_2\text{)}_2\text{Cl} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{-CH-CH}_2\text{-CH-CH}_2\text{-} \\ \quad \\ \text{CH}_2\text{NH(CH}_2\text{CH}_2\text{NH)}_n\text{H} \end{array}$
Ion-form of commodity	Na-form	H-form	Cl-form	OH-form
Color and form	Light brown translucent beads	White opaque beads	Light brown translucent beads	Light yellow opaque beads
Apparent density(g/L)(reference value)	825	690	685	650
Moisture(%)	43~50	40~46	43~47	39~45
Exchange capacity(meq/L)	above 1.9	above 3.5	above 1.3	above 2.5
do(gCaCO ₃ /L)	above 95	-	-	-
Effective coefficient	0.4~0.6	0.35~0.55	0.35~0.55	0.35~0.55
Uniformity coefficient	below 1.6	below 1.6	below 1.6	below 1.6
Size range(μ)(below 297μ: below 1%)	1,190~297	1,190~297	1,190~297	1,190~297
Durable temperature(°C)	below 120(Na, H-form)	120(H, Na-form)	below 60(OH-form) below 60(OH-form)	100(OH-form)
Effective pH range	0~14	4~14	0~14	0~9

[표 2-5. 수증의 주요한 침전 반응]

반응식	비고
$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 = \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	-알칼리도(Alkalinity)와 경도성분의 반응(백색의 침전물)
$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + 2\text{NaOH} = \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{Na}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$	
$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 + 4\text{NaOH} = \text{Mg}(\text{OH})_2 \downarrow + 2\text{Na}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$	
$\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2 + 4\text{NaOH} = \text{Fe}(\text{OH})_2 \downarrow + 2\text{Na}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$	-Alkalinity와 철분의 반응(적색의 침전물)
$2\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 = 2\text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow$	
$\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 = \text{CaCO}_3 \downarrow + 2\text{NaCl}$	-경도성분과 용존염류의 반응(통상 백색의 분필과 같은 침전물)
$\text{MgCl}_2 + 2\text{NaOH} = \text{Mg}(\text{OH})_2 \downarrow + 2\text{NaCl}$	
$\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 = \text{CaSO}_4 \downarrow + 2\text{NaCl}$	
$3\text{CaCl}_2 + 2\text{Na}_3\text{PO}_4 = \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \downarrow + 6\text{NaCl}$	-경도성분과 인산염의 반응(미색의 침전물)
$\text{CaCl}_2 + \text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{NaOH} \rightarrow 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$	
$\text{Ca}^{2+} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3$	-규산칼슘 형태의 침전(계란 껍질과 같은 침전물)

수도가 대부분 사용되고 있다. 지역적인 특성으로 서산·아산지역은 담수(Blackish Water)를 공업용수로 사용하고 있으나 용수중의 염소이온(Cl)의 농도가 극히 높아 RO시스템을 전처리로 채택하고 있으며 처리된 순수를 공업용수로 사용하고 있는 실정이다.

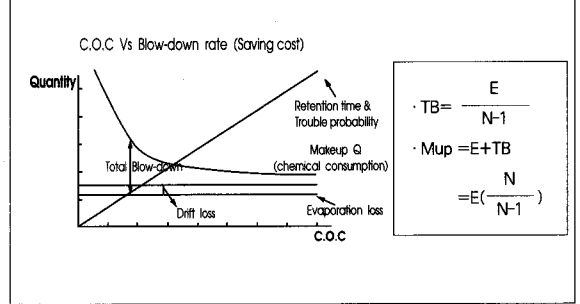
냉각수와 같은 용수의 절대량을 줄이기 위해서는 일반적으로 농축도를 상향 조정하는 방법을 적용할 수 있으나, 냉각 펌의 가동이나 pump sealing 등에 의하여 일부가 계외로 배출되기 때문에 무한 농축은 불가능하다.

또한 농축도가 상승할수록 용수 사용량과 Chemical 사용량 등의 운전비용은 감소하나 각종 용존염류의 농

도 상승으로 인하여 장애 발생률도 증가하게 된다.

예로서 증발량(Evaporation Loss) 100m³/hr 규모의 냉각탑을 갖는 냉각수계(순환량 5,500m³/hr, ΔT=10℃)의 농축도(Cycles of concentration)에 따른 용수의 사용량은 다음과 같다.

[그림 3-1. 냉각수의 농축배수와 용수 사용량 관계]



결국 보급수량의 사용량은 농축도(COC)가 상승할수록 감소하지만, 농축도가 상승할수록 수량의 감소폭도 절대적으로 감소하게 되어 8배이상의 농축운전 이상에서는 용수절감의 커다란 기대효과를 추가 상승에 의해 얻기 힘들다.

한편 농축도에 따른 장애 발생 가능성은 농축도의 상승에 비례하는 형태가 예상되므로 고농축 조건에서 추가 농축도의 상승으로 인해 얻어지는 용수 사용량의 감

[표 3-1. 농축도에 따른 보급수량 변화 예]

종류	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
배출수량 (m ³ /hr)	5,500	100	50	33.3	25	20	16.7	14.3	12.5	11.1
용수사용량 (Make up Water, m ³ /hr)	5,500	200	150	133.3	125	120	116.7	114.3	112.5	111.1

소분이 적은 반면에 장애 발생률은 절대량이 증가하게 되므로 유의하여야 한다.

또한 Blow down을 완전 배제한 Zero-Blow down 운전의 경우에도 농축도는 Leak 수량이나 비산수량



(Drift Loss)에 의하여 간접적인 Blow down이 이루어지게 되어 무한농축은 불가능하다.

참고로 전술한 냉각수계의 최대 가능 농축도는 비산수량을 순환수량의 0.1%로 환산했을 경우 최대 농축도는 19.2배에 해당되며, 일반적인 비산수량인 0.2%로 환산시에는 최대 농축도는 10.1배에 불과하여 농축도의 한계인자로 작용하게 된다.

- 총배출량(TB)=강제 Blow down+비산수량(Drift Loss)
- 강제 배출량=0, 비산수량=5.5m³/hr(0.1% RR)
- TB=DL=5.5m³/hr

$$TB = \frac{E}{N-1} \quad \text{이므로} \quad N = 19.2(\text{Max})$$

따라서 농축도가 낮게 운전되는 냉각수계에서는 농축도를 상향 조정하는 최적화 방안을 통하여 용수절감이 충분히 가능하며, 고농축 운전을 이미 실시하고 있는 경우에는 절대량의 용수절감을 위해서는 농축도 상승 이외의 방안 모색이 필요하다.

냉각수 이외의 수계에서는 보일러수계가 주요 절감 포인트가 될 수 있으며 이 경우 압력 용기라는 설비조건 때문에 보일러수 농축도의 무한 상승보다는 사용된 증기의 회수량을 증가시켜 용수 사용량을 절감시키는 방법이 바람직하다. 이는 압력용기의 장해현상은 설비의 파열·폭발이라는 치명적 안전사고로 직결될 수 있기 때문이다.

2. Condensate 회수를 증진의 한계요인 및 대책

보일러에서 발생한 증기는 일반적으로 공정의 가온등에 사용후 배출되거나 Condensate Recovery Cooling Heat Exchanger를 거쳐 재차 보일러의 급수로 사용되게 된다.

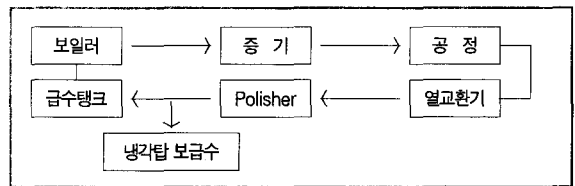
그러나 전량 회수되는 경우는 극히 드물고 일부만이 회수되어 재사용되는 경우가 일반적이다. 회수율이 비교적 낮은 이유는 인식의 부족과 함께 Condensate

Water(응축수)에 용존되어 있는 철분의 농도가 높아 Reuse에 적합치 않은 것이 일반적인 이유이며, 응축수의 수질은 순수에 근접한 수질을 갖는 특성이 있다.

따라서, 응축수의 회수율을 증진시키기 위해서는 Condensate계의 부식방지를 위한 Chemical의 적용과 함께 오염원을 제거하는 방안의 채택이 필요하다.

응축수의 주된 오염물인 철분은 양이온 교환수지나 Mixed bed polisher(혼상탑)를 거침으로서 제거가 가능하며, 활성탄층을 통과시켜 여과 제거하는 방안도 적용이 가능하다.

[표 3-2. Condensate Recovery System의 예]



아울러 국내의 일부 공장에 있어서는 Steam 응축수를 부족한 냉각용수의 보급수로 일부 활용하는 경우도 있으나, 이 경우 보급수의 온도 상승에 따른 파생적 문제가 발생하지 않도록 사전에 검토할 필요가 있다.

또한 경제적인 처리 cost를 비교하여 전체 처리경비가 Saving되는 방안의 채택이 바람직하다.

Steam 응축수를 냉각수의 보급수원으로 일부 사용하는 S사의 응축수 수질에는 하기와 같으며 적용 효과는 용수 사용량의 절감(RO를 일반 보급수로 사용)으로 100m³/hr 규모이다.

항 목	Cond. (us/cm)	pH	T-Fe (ppm)	Ca-H (ppm)	Alkalinity (ppm)
농 도	21	9.0	0.04	0	Trace