

ORIGINAL ARTICLE

물 자원 생산을 위한 Coal Seam Gas Water Management Study의 평가 및 분석

2. 처리기술 예측 및 병합 시스템 설계

신춘환*

동서대학교 에너지환경공학과

Assessment and Analysis of Coal Seam Gas Water Management Study for Water Resource Production

2. Prediction of Treatment Technology and Design of Co-treatment System

Choon-Hwan Shin*

Department of Energy & Environmental Engineering, Dongseo University, Busan 617-716, Korea

Abstract

To develop various usable water from coal seam gas (CSG) water that needs to be pumped out from coal seams for methane gas production, a feasibility study was carried out, evaluating and analysing a recent report (Coal Seam Gas Water Management Policy 2012) from Queensland State Government in Australia to suggest potential CSG water treatment options for fit-for-purpose usable water production. As CSG water contains intrinsically high salinity-driven total dissolved solid (TDS), bicarbonate, aliphatic carbon, Ca^{+2} , Mg^{+2} and so on, it was found that appropriate treatment technologies are required to reduce the hardness below 60 mg/L as CaCO_3 by setting the reduction rates of Ca^{+2} , Mg^{+2} and Na^+ concentrations, as well as TDS reduction. Also, Along with fiber filtration and membrane separation, an oxidation degradation process was found to be required. Along with salinity reduction, as CSG water contains organic compounds (TOC: 248 mg/L, $\text{C}_6\text{-C}_9$: <20 mg/L and $\text{C}_{10}\text{-C}_{36}$: <60 mg/L), compounds with relatively high molecular weights ($\text{C}_{10}\text{-C}_{36}$) need to be treated first. Therefore, this study suggests a combined system design with filtration (Reverse osmosis) and oxidation reduction (electrolysis) technologies, offering proper operating conditions to produce fit-for-purpose usable water from CSG water.

Key words : CSG water management policy, CSG water, Usable water production, Combined system

Received 12 October, 2015; Revised 4 December, 2015;

Accepted 8 December, 2015

*Corresponding author : Choon-Hwan Shin, Department of Energy & Environmental Engineering, Dongseo University, Busan 617-716, Korea

Phone: +82-51-624-9910

E-mail: 6116shin@gdsu.dongseo.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

인구 증가로 인하여 물 수요는 급증하고 있는데도 불구하고 가뭄, 홍수 등 이상기후로 물 공급이 수요를 만족 시키지 못하고 있는 현실에 비추어 물은 이제 더 이상 자연이 주는 선물의 개념이 아니라 생명유지를 위한 자원으로서의 가치를 인정받고 있다. 이에 따라 근래에 와서는 석탄, 석유와 같은 재생 불가능 자원과 비교하여 순환 가능한 자원으로 평가하고 있기 때문에 자원 순환의 차원에서 물 자원 생산을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다(Chris, 2013; Galilee Energy, 2013; Greenlee, 2009; KOFAC, 2015; Pendergast, 2011; Shin and Bae, 2012; Shin et al., 2014). 이러한 관점에서 우리나라의 경우에도 물 산업 육성책(Min. Commerce, Industry & Energy, 2007)을 발표하면서 해수 담수화, 하수 재이용, 물 고도처리 등의 중요성을 강조하고 있으며 세계 각국에서 개최되고 있는 물 포럼(Min. Environ., 2015)에서 물 자원 생산은 물 재이용, 신기술 개발, 물 전략 교육 등 세 가지 키워드를 통해 달성해야 한다고 강조하고 있는 점을 동시에 감안하면 물 자원 생산을 위한 순환 공정의 중요성을 인정 할 수 있다.

특히 물 부족국가의 범위에서 벗어나 있는 것처럼 여겨졌던 호주에서 조차 2011년 대홍수를 기점으로 식수를 비롯한 용수공급을 위해 석탄층으로부터 회수되는 석탄층 지하수(CSG Water: Coal seam gas water)의 수익적 이용 방법에 관한 보고서(AUS Dept., Natural Resource, 2013)를 작성함으로서 물 자원 생산을 국가 정책으로 발표하고 있다. 이러한 석탄층 지하수의 유출량은 용수로서 충분한 수량을 제공하고 있기 때문에 처리기술 및 관리 계획 등 후속 조치가 필요하다고 판단하고 있다(Origin Energy, 2013a; APLNG, 2013).

이와 같은 후속 조치는 수량 및 수질에 따른 처리기술의 방향 제시가 우선되어야 한다고 보면 국내 기술 범위에서 가능할 것으로 예상되기 때문에 Coal Seam Gas Water Management Policy을 용도에 따른 수질 평가와 함께 처리 방법을 예측함으로서 국내 물 처리 기술의 해외 진출에 기여하고자 한다. 먼저 Coal Seam Gas Water Management Policy를 분석하여 용수생산의 범위를 판정한 이전의 연구 결과(shin, 2014)와 연결하여 석탄층 지하수는 염분 등에서 유래된 TDS(total dissolved

solid), bicarbonate, aliphatic carbon, Ca^{+2} , Mg^{+2} 등이 함유되어 있는 특징으로 인하여 TDS 저감과 함께 Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} 각각의 농도 저감비율을 산정하기 위한 고-액 분리 기술의 선택과 함께 BOD 저감을 위한 산화 분해 기술의 범위를 설정할 필요가 있기 때문에 이들 각각의 농도 저감을 위한 기능성 단위 반응조의 선택과 요구수질 범위를 만족하는 단위반응조의 병합 방법을 제시하고자 한다. 또한 CSG Water의 대표 수질(AUS Environment Protection Agency, 2012; Origin energy, 2013b; 2013c)에서 total organic carbon(TOC)으로 표시된 유기화합물의 농도가 248 mg/L, $\text{C}_6 - \text{C}_9$ 가 <20 mg/L, $\text{C}_{10} - \text{C}_{36}$ 가 <60 mg/L 인 점을 감안하면 TOC 저감 기술 특히, 분자량이 상대적으로 큰 $\text{C}_{10} - \text{C}_{36}$ 의 처리에 대한 고도 처리 기술을 예측하고자 한다.

2. 자료 평가 및 기술 예측 방법

2.1. CSG 와 CSG Water의 회수

Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 CSG water의 회수 공정은 dewatering stage (석탄층 탈수 단계), stable production stage (안정적인 석탄층 지하수 생산 단계), 그리고 decline stage (발생량 감소 단계)로 구분하고 있으나(Paul et al., 2009; 2014) Coal Seam Gas Water Management Policy Study에서 제시하고 있는 대표수질은 전체 영역에 대한 CSG Water(AUS Environment Protection Agency, 2012; Galilee Energy, 2013)의 분석 자료일 것으로 감안하고 본 연구의 평가에 활용하고자 한다.

2.2. 대표 수질 평가 및 도입 기술 선정

Table 1과 같은 Bowen basin에서 회수된 11,600,00 ton의 CSG Water의 대표 수질을 중심으로 1차적인 처리 기술을 예측하고자 하며 특히 TDS, 염분, bicarbonate의 농도가 다른 인자에 비해 높다는 사실을 확인 할 수 있기 때문에 이들의 처리를 위한 접목 가능한 기술을 우선적으로 선정하고 병합시스템의 범위를 제시하고자 한다.

2.3. 용도별 수질기준 및 처리기술 예측

석탄층 지하수의 안정적 처리기준(Water Act, 2000)과 처리수의 상수도 공급원 등 수요 맞춤형 수자원으로

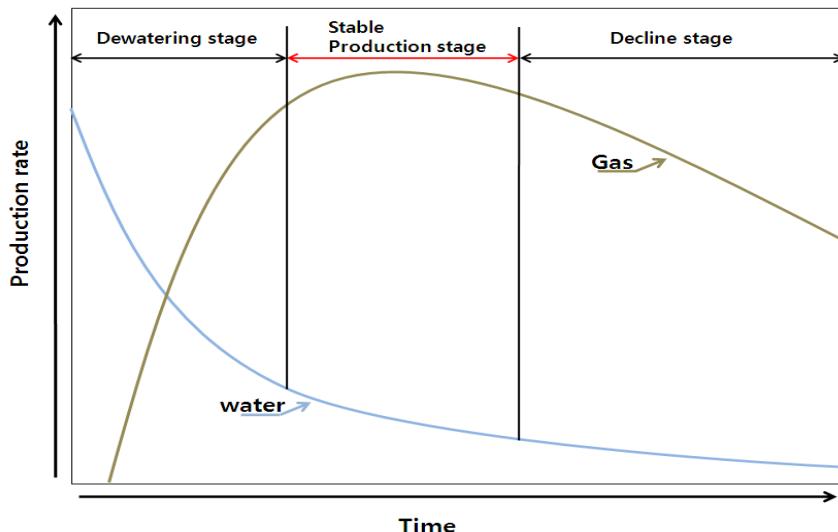


Fig. 1. CSG Water production with a operating stage.

Table 1. Characteristics of CSG water quality(Bowen basin)

Water quality	Unit	Concentration(ppm)
pH		8 - 9
Total Dissolved Solids	mg/L	1,200 - 4,300
Calcium	mg/L	3 - 9
Magnesium	mg/L	1 - 3
Sodium	mg/L	300 - 1,700
Chloride	mg/L	590 - 1,900
Sulphate	mg/L	5 - 10
Bicarbonate	mg/L	580 - 950

활용하는 기본 정책(Water Supply Act, 2008) 및 석탄 층 지하수의 효율적인 처리를 통해 환경오염을 예방하고 처리수의 수익적 이용을 촉진하기 위한 석탄층 지하수의 전략적 관리(AUS Min. Environment and Heritage Protection)를 분석하여 처리기술을 예측하고자 하였다.

2.4. 단위 반응조 선정 및 병합 시스템 구성

이전의 연구결과에서 밝힌바와 같은 CSG water의 수익적 이용 방향에 나타난 용도별 요구 수질을 중심으로 단위 반응조의 범위를 선정하고자 하였으며 이들을 병합한 시스템의 범위를 확인하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. CSG water management policy의 제안 기술 분석

CSG water management policy에서는 처리기술의 우선순위를 위생처리에 두고 있다(AUS Dept., Natural Resource, Queensland, 2012). 이는 용도별 수질 상승을 위한 방법으로서 UV이용, 혹은 화학처리를 제안하고 있으나 SS나 TDS 처리효율에는 미치지 못하는 단점도 지적하고 있다. 또한 탈염의 방법으로 RO, 이온교환, compactive desalination(CDI), 역 전기영동(electro -dialysis revesal, EDR), 증발법 등을 각각의 장·단점

Table 2. Comparison of produced water with guideline values for irrigation and stock watering

	unit	Upper Limit for cotton irrigation	Upper limits for livestock with no product loss	Water rang of Produced water to Date in the Surat Basin
Total Dissolved Solids(TDS)	mg/L	1200 ppm	8000 beef 10,000 sheep 6000 pigs	2260 — 5060
Bicarbonate	mg/L	—	—	1120 — 2060
pH	—	Exceed 5~6	—	8.4 — 8.9
Chloride	mg/L	700	—	548 — 2060
Sodium	mg/L	460	—	918 — 1840
Fluoride	mg/L	2	2-4	2.9 — 4.5
SAR		Approx. 10	—	107 — 160

을 정리하여 제안하고 있다. 이러한 탈염 기술은 경제성 검토 후에 적용이 가능하다는 단서 조항이 첨부되어 있기 때문에 저비용 고효율의 탈염기술에 대한 검토가 필요함을 암시하고 있다. 아울러 여과 기술 또한 분리막의 응용 혹은 습지여과를 제한적으로 적용이 가능하다고 밝히고 있는 점을 미루어 보아 SS 제거를 위한 시공 실적이 있는 국내 기술의 접목의 여지가 있음을 보여주고 있다.

3.2. 용도별 요구 수질 분석에 의한 처리 기술 예측

Table 2에서 볼 수 있는 바와 같이 TDS는 CSG water가 회수 일 기준으로 2,260~5,060 mg/L의 농도범

위를 가지고 있으며 관개용수로의 용도를 만족하기 위해서는 1,200 mg/L 수준으로 낮추어야함을 알 수 있다. 또한 탄산이온인 HCO_3^- 는 1,120~2,060 mg/L에서 0 수준으로, 특히 Ca^{+2} , Mg^{+2} 의 농도평균에 대한 Na^+ 농도의 분율을 나타내는 SAR은 10으로 한정하고 있기 때문에 관개용수로 사용하기 위해서는 TDS와 염분 농도의 제거가 필수적임을 알 수 있다. 이는 이전의 논문에서(Shin, 2014) 밝힌 바와 같이 염분에서 유래한 TDS의 제거가 SAR 값의 감소를 유발한다는 결론으로부터 해석이 가능하며 탄산이온 역시 경도 및 알칼리도와 상관성이 있

Table 3. Livestock response to water quality limits

TDS (mg/L)	Livestock Watering Comments
Less than 1000	Excellent for all classes of livestock.
1000 to 2999	Very satisfactory for all classes of livestock. May cause temporary and mild diarrhoea in livestock not accustomed to them.
3000 to 4999	Satisfactory for livestock, but may causes temporary diarrhoea or be refused at first by animals not accustomed to them.
5000 to 6999	Can be used with reasonable safety for dairy and beef cattle, sheep, swine, and horses. Avoid use for pregnant or lactating animals.
7000 to 10,000	Considerable risk in using for pregnant or lactating cows, horses or sheep, or for the young of the young of these species. In general, use should be avoided although older ruminants, horses, poultry, and swine may subsist on them under certain conditions.
Over 10,000	This water is considered unsatisfactory for all classes of livestock.

Source: All consulting 2003

Table 4. Irrigation water salinity ratings based on electrical conductivity

TDS (mg/L) ¹	Water Salinity rating	Plant suitability	Example for Potential crop ²
<390	Very low	Sensitive crops	
390-780	Low	Moderately sensitive crops	Flowers/shrubs/fruits
780-1740	Medium	Moderately tolerant crops	Clover ³
1740-3120	High	Tolerant crops	Corn, soy bean, lucerne, sorghum, sunflower ³
3120-4860	Very high	Very tolerant crops	Barley, cereals (wheat) ³ , cotton
>4860	Extreme	Generally too saline	

1. Approximate conversion applied/EC units X 0.6 = mg/L

2. Department for Water Resources, SA

3. relative yields for salinity figures is approximately 75%

기 때문에 SAR 값의 감소를 위한 제거 대상 이온임을 알 수 있다.

TDS의 농도별 사용구분을 나타낸 Table 3에서 확인 할 수 있는 사실은 일반적인 경우 1,000 ppm 이하에서는 모든 생활용수에 사용 할 수 있으며 500 ppm 이하이 면 음용수로서도 사용이 가능한 결과와 비교할 수 있다 (Aus International Longwell News, 2013; Chris, 2013). 또한 가축용수로서는 Table 2에서 알 수 있는 바와 동일하게 6,000 ppm 이상의 고농도의 경우에도 사용 할 수 있어 용도에 따른 TDS의 저감범위를 예측할 수 있는 좋은 정보를 제공 하고 있다.

Table 4와 Table 5에는 전기전도도와 TDS의 상관성 으로부터 사용 가능한 범위를 지정하고 있다. 즉 이온성 물질의 농도로 계산되는 이온세기= $2.5 \times 10^{-5} \times \text{TDS}$ 와 이온세기= $1.6 \times 10^{-5} \times \text{비전도도}$ 의 상관관계가 성립한다는 결과로부터(Snoeyink and Vernon, 1996) 염분에

서 유래된 TDS는 전기전도 측정에 의해 농도 예측이 가능하다. 따라서 TDS는 전기전도도를 상승시키는 요인으로 작용하기 때문에 전기전도도가 높은 경우에는 이에 민감한 작물재배용으로는 사용이 제한된다는 사실을 알 수 있으며 이온성 물질의 저감에 대한 검토가 필요함을 암시하고 있다.

3.3. CSG water의 처리대상 물질 및 처리 기준

CSG water는 석탄층의 오염에 의해 흑화현상이 나타나며(Higgins et al., 2012; Metgasco Energy, 2013; Randol, 2013) 이를 처리하기 위해서는 활성탄 흡착 및 중력여과 등의 공정 적용이 가능 할 것으로 예상되기 때문에 활성탄의 micropore, mesopore, macropore의 분포를 밝힌 이전 연구(shin and Bae, 2009)의 결과를 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 미량 중금속 제거를 위한 처리기술(Saito et al., 2012; Shannon et al., 2008)

Table 5. Irrigation water salinity ratings based on electrical conductivity

EC (dS/m)	Water salinity rating	Plant suitability
<0.65	Very low	Sensitive crops
0.65-1.3	Low	Moderately sensitive crops
1.3-2.9	Medium	Moderately tolerant crops
2.9-5.2	High	Tolerant crops
5.2-8.1	Very high	Very tolerant crops
>8.1	Extreme	Generally too saline

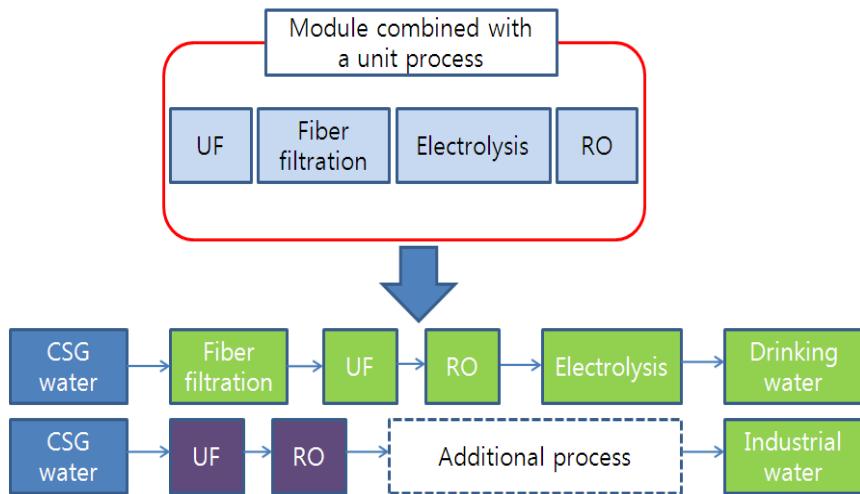


Fig. 2. Schematic diagram for introduction technology.

과 질산염, 아질산염 등의 탈질을 위한 국내 호기 처리공정 중 외부탄소원을 활용하여 처리하는 공정이 잘 알려져 있기 때문에(Shin, 2012) 요구 수질의 범위에 따라 이용 가능한 기술로 선정 할 수 있다. 특히 TDS의 유발 원인이 되는 salt 성분은 국내 소금 생산기업의 회수 및 정제 기술을(Hanju, 2008) 활용할 수 있을 것으로 판단이 가능하며 필요할 경우 천연제올라이트를 이용한 이온교환 공정 혹은 전기분해 및 RO 시스템 역시 도입 가능한 후보공정(Achilli et al., 2014; Greenlee et al., 2009; KOFAC, 2015)으로 판단하였다.

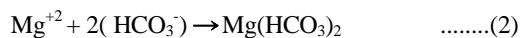
3.4. 도입 가능한 단위공정의 범위

이상의 결과로부터 Fig. 2와 같은 도입 가능한 기술의 범위를 설정하였다. 먼저 SS의 제거를 위한 여과기능으로는 소요부지 감소와 저렴한 설치비용을 장점으로 하고 있는 섬유여과(Sseng Co, 2012)를 제안하고자 하며 유기물 및 난분해성 탄화수소의 산화 분해를 위해서는 전기분해 시스템을(Chen et al., 2002; Shin, 2009) TDS 및 이온성 물질 저감에 의한 SAR 값의 감소를 유도하는 처리 기술로는 RO 시스템(Matsumura et al., 2001; Saito et al., 2012)을 추천하고자한다. 다만 섬유여과는 전단에 응집 시스템의 설치가 필요하기 때문에 경제성 비교를 거쳐 막 여과로의 변경 가능성도 예상 할 수 있기 때문에 후보 시스템의 제작 과정에서 검토의 대상이 될

것으로 판단하며 필요한 경우 응집처리를 제외한 섬유여과와 막여과의 단독(Pendergast, 2011; Shin, 2010) 및 병합도 제안하고자한다. 또한 요구수질의 범위에 따라서는 에너지 소모가 단점으로 지적되고 있는 전기분해를 대체할 수 있는 처리기술을 추가 공정으로 설정하여 병합 시스템 구성의 유연성을 부여하고자한다.

3.5. 단위공정의 병합에 의한 제거공정 예측

3.3의 도입기술은 Fig. 3과 같은 제거 공정의 차례를 예상 할 수 있다. 즉, 먼저 salt 성분 제거에 의한 TDS 저감과 이에 따른 TDS 저감에 영향을 미치는 Ca^{+2} , Mg^{+2} 와 같은 경도 유발 이온과 탄산이온이 동시에 제거되며 이어서 전기분해 혹은 고도산화에 의한 유기물 제거와 RO에 의한 이온성 물질의 제거의 차례로 진행된다. 여과방법은 전단 및 후단의 어느 위치에도 가능할 것으로 판단하였다. 여기서 Ca^{+2} 와 Mg^{+2} 는 알칼리도 유발 이온인 HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- 이온과 반응하여 제거된다. 다만, CSG water에 잔류하는 알칼리도는 HCO_3^- 가 대부분을 차지하고 있으며(KOFAC, 2015) 반응식은 아래와 같이 정리할 수 있다.



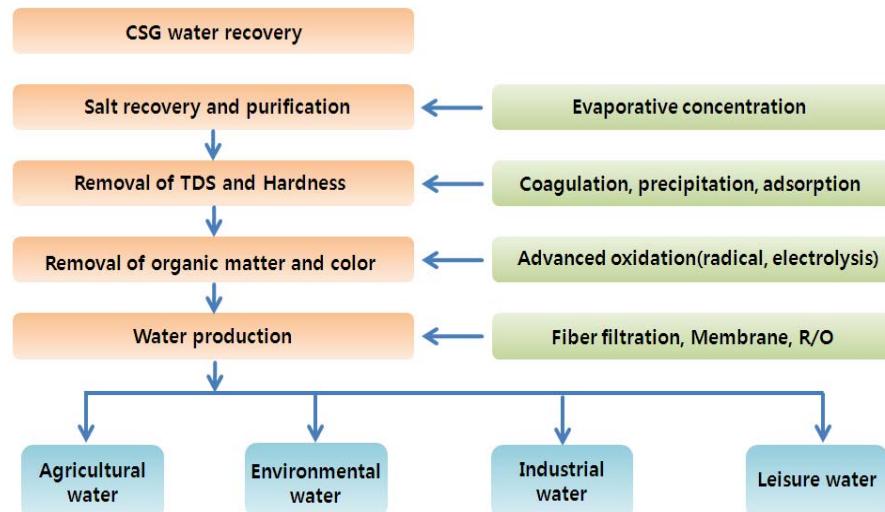
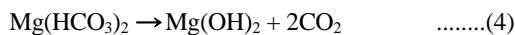


Fig. 3. Schematic process for the production of water resource using the CS G water.



여기서 Ca^{+2} 는 CaCO_3 로, Mg^{+2} 는 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 로 침전 할 때 최적 침전의 pH 범위는 Ca^{+2} 가 9.0~9.5, Mg^{+2} 는 11.0이기 때문에(Reynolds, 2010) bicarbonate의 제거를 위한 처리공정에서 pH 조절의 필요성을 제안하고자 한다.

결론적으로 Fig. 3에서 보면 Salt 성분이 제거된 석탄 층 지하수로부터 용수를 생산하기 위한 시스템은 관개용수, 청소용수, 농·축산용수, 조경용수, 소방용수, 공업용수, 수경재배용수, 음용수 등의 용도를 만족하는 처리기

술의 운전조건 설정에 의한 최적화와 같은 후속 조치가 필요함을 알 수 있다. 특히 분자량이 큰 난분해성 유기물 및 색도제거를 위한 처리 공정은 단위 반응조의 병합뿐 만 아니라 고도산화의 필요성을 요구하고 있기 때문에 오존산화 및 전기분해 기술의 도입과정에서 오존 발생의 효율성(Shin and Bae, 2012; Shin et al., 2014) 및 전기 전도도 상승 방법(Shin, 2009)등을 감안한 최적 운전 조건을 설정하여 현장 적용성을 제시하는 추가 연구가 필요하다고 판단하였다.

3.6. 표본 공정의 처리비용 분석 및 평가

Coal Seam Gas Water Management Policy study

Table 6. Desalination capital, operating and maintenance costs

Technology	Capital costs \$/(KL/d)	Operating Costs \$(kL/d)
Multistage Flash Distillation	2000-3800	Dependant on Energy costs
Milti effect Distillation	2500-3900	1.8-2.8(no waste heat available) 0.055-0.95(waste heat available)
Vapour Compression Distillation	1600-1700	Dependant on Energy costs
Reverse Osmosis (RO)	700-1000(brackish water) 1700-2400 (seawater)	0.65-1.5 (brackish waters) 1.89-2.2 (seawater)
Electrodialysis Reversal (EDR)	570-3250	1.00-2.80

Source: GHD 2012 Desalination in Queensland

에서는 탈염공정을 표본공정으로 Table 6과 같은 투자 및 운전비용을 제시하고 있다. 여기서 보면 증류기술에 대한 투자 비용이 1,600~3,800 \$(kL/d), RO와 EDR은 570~2,400 \$(kL/d)임을 확인할 수 있다. 따라서 증발에 의한 탈염처리 보다는 RO와 EDR에 의한 처리가 상대적으로 투자비용은 적으며 운전비용 면에서도 같은 현상을 보이고 있다. 다만, 염분 농도가 30,000~40,000 ppm 인 해수의 경우에는 RO에 의한 투자비용이 증발기술의 투자비용에 접근하고 있으나 고농도 염분으로 평가되는 brackish water의 경우에는 투자비용을 1,600~1,700 \$(kL/d), 운전비용은 0.65-1.5\$(kL/d)으로 제시하고 있어 이 보다는 저 농도인 CSG water는 모든 비용이 brackish water의 처리비용 보다는 더 적을 것으로 예상 할 수 있다. 이러한 결과로부터 TDS와 이온성 물질의 제거에 도입 가능한 RO 공정은 가능성 분리막의 선정과 함께 운전기술의 최적화에 의한 에너지 저감 효율을 제시함으로서 경쟁력 확보가 가능하다고 판단된다.

4. 결론

Coal Seam Gas Water Management Policy study를 분석하여 용도 맞춤형 용수 생산을 위한 CSG water의 처리기술 예측 및 병합 시스템 설계에 대한 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용수 생산을 위한 CSG water의 처리공정은 섬유여과 및 막 분리에 의한 여과 기술, 유기물 제거를 위한 고도산화 기술, 이온성 물질 및 TDS 제거를 위한 전기분해와 RO 공정을 병합시스템의 단위 공정으로 제안하고자 하며 생산용수의 용도에 따른 최적 운전조건 설정을 후속 연구로 추진하고자 한다.

2) CSG water에 잔류하는 일칼리도는 HCO_3^- 가 대부분을 차지하고 있는 결과로부터 Ca^{+2} 는 CaCO_3 로, Mg^{+2} 는 Mg(OH)_2 로 침전 할 때 최적 침전의 pH 범위는 Ca^{+2} 가 9.0~9.5, Mg^{+2} 는 11.0임을 감안하면 bicarbonate의 제거를 위한 처리공정에서 pH에 따른 제거 효율은 TDS의 농도를 결정하는 중요한 인자로 확인되었다. 특히 TDS는 생산 용수의 용도를 결정하는 일차적인 역할을 하기 때문에 TDS 저감을 위한 처리시스템은 섬유여과 및 막분리와 RO 공정의 병합이 적정기술 임을 확인하였다.

3) 염분 농도가 30,000~40,000 ppm인 해수의 RO 처리에 대한 투자비용이 증발기술의 투자비용에 접근하고 있으나 고농도 염분으로 평가되는 brackish water의 경우에는 투자비용을 1,600~1,700 \$(kL/d), 운전비용은 0.65-1.5\$(kL/d)으로 제시하고 있어 이 보다는 저 농도인 CSG water는 모든 비용이 brackish water의 처리비용 보다는 더 적을 것으로 예상할 수 있기 때문에 TDS와 이온성 물질의 제거에 도입 가능한 RO 공정은 가능성 분리막의 선정과 함께 운전기술의 최적화에 의한 에너지 저감 효율을 제시함으로서 경쟁력 확보가 가능함을 확인하였다.

감사의 말씀

본 연구는 동서대학교 2015년 특별 연구비와 2015년 부산지역녹색환경 지원센터의 연구비 지원(과제번호:15-4-10-13)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Achilli, A., Prante, J. L., Hancock, N. T., Maxwell, E. B., Childress, A. E., 2014, Experimental results from RO-PRO: A next generation system for low-energy desalination, Environ. Sci. Technol., 48(11), 6437-6443.
- APLNG, 2013, CSG water production forecasts; Surat water production vs great artesian basin.
- AUS Department of Environment and Heritage Protection, Queensland, 2013 , Water quality criteria for coal seam gas water.
- AUS Department of Natural Resource, Queensland 2013, Coal seam gas water management study.
- AUS Environment Protection Agency, Queensland, 2012, Coal seam gas water quality.
- AUS International Longwell News, 2013, QLD's CSG water policy to benefit environment.
- Chen, G., Chen, X., and Yue, P. L., 2002, Electrochemical behavior of novel Ti/IrO₂-Sb₂O₅-SnO₂ anode, J. Phy. Chem. B., 106, 775-788.
- Chris, M., 2013, Approach to understanding and managing impacts of co-produced water, 5th annual CSG associated water conference.
- Galilee Energy, 2013, CSG water production forecasts;

- Water treatment(process option, water retention pond and evaporation).
- Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., Moulin, P., Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges, 2009, *Water Res.*, 43, 2317-2348.
- KOFAC, 2015, Technical report, Manufacturing of imitated real plant for the system of water reuse. Hanju Ltd. 2008, Technical catalogue.
- Higgins, J., Warnken, J., Teasdale, P. R., 2012, A review of water quality criteria in australian reclaimed water guidelines and sewage effluent discharge licences.
- Matsuura, T., 2001, Progress in membrane science and technology for seawater desalination - a review. *Desalination*, 134, 47-54.
- Metgasco Energy, 2013, CSG water production Forecasts; Australian CSG basin.
- Ministry of Commerce, Industry & Energy, 2007, A policy of water industry growth.
- Ministry of environment, 2015, 7th international water forum.
- Origin Energy, 2013, CSG water production forecasts; General water treatment.
- Origin Energy, 2013, CSG water production forecasts; CSG water quality and comparisons.
- Origin Energy, 2013, CSG water production forecasts; CSG technology and process(brine treatment skid).
- Paul, M., Muthia, E., Bae, J. S., Victor, R., Shin, C. H., 2009, Gas adsorption measurement on coals for CO₂-ECBM, 2009, Asia-Pacific coalbed methane symposium, 88-92.
- Paul, M., Iyer, R. S., Muthia, E., Timothy, N., 2014, An Experimental study on characterising coal bed methane (CBM) fines production and migration of mineral matter in coal bed, *Energy and Fuels*, in print.
- Pendergast, M. T. M., Hoek, E. M. V., 2011, A review of water treatment membrane nanotechnologies. *Energ. Environ. Sci.*, 4, 1946-1971.
- Randol, C., 2013, Managing the impacts of CSG water extraction in the surat basin, 5th annual CSG associated water conference.
- Saito, K., Irie, M., Zaitsu, S., Sakai, H., Hayashi, H., Tanioka, A., 2012, Power generation with salinity gradient by pressure retarded osmosis using concent -rated brine from SWRO system and treated sewage as pure water, *Desali. water treat.*, 41(1-3), 114-121.
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J., Mayes, A. M., 2008, Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452, 301-310.
- Shin, C. H., Bae, J. S., 2012, A stability study of an advanced co-treatment system for dye wastewater reuse, *J. Ind. Eng. Chem.*, 20(6), 775-779.
- Shin, C. H., Bae, J. S., Victor, R., 2014, Co-treatment systems combined with unit processes for dye waste -water recycling, *J. Ind. Ind. Chem.*, 20(1), 710-716.
- Shin, C. H., 2012, Automatic addition control of the external carbon source by the measurement of ORP in biological nitrogen removal process, *J. Kor. Environ. Sci.*, 21(3), 383-390.
- Shin, C. H., Kang, D. H., Park, H. S., Cho, H. K., 2010, Initial operating condition of membrane bioreactor with PVDF hollow fiber and permeate reuse, *J. Clean Tech.*, 16(1), 39-45.
- Reynolds, T. D., Unit operation and processes in environmental engineering, Texas A&M press, 257-280.
- Shin, C. H., 2009, Effect of indirect oxidation on the system design for the reuse of sewage and waste -water, *J. Clean Tech.*, 15(2) 112-119.
- Shin, C. H., 2014, Assessment and analysis of coal seam gas water management study for water resource production. 1. water production, *J. Kor. Environ. Sci.*, 23(8), 1395-1407.
- Snoeyink, Vernon, 1992, Water chemistry, John Wiley & Sons Inc., 71-80.
- Sseng corporation, 2012, Technical report, Development of 2-stage fiber filtration process for the reuse of sewage.