

감압증발장치와 해수담수화의 조건

시 호[†] · 윤성열 · 이승원 · 문덕수 · 이호생 · 김현주
선박해양플랜트연구소

Conditions of Desalination with Reduced Pressure Evaporation Device

Ho Ji[†], Sung Yeol Yun, Seung Won Lee, Deok Soo Moon, Ho Saeng Lee and Hyeon Ju Kim
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

요 약

감압증발장치는 압력을 감소시켜 물의 끓는점을 낮추는 원리를 이용한 것으로 온도를 높이는데 필요한 에너지 소모량을 줄일 수 있는 원리로 사용되고 있다. 즉, 온도와 압력의 상관관계 원리를 이용한 것이다. 감압증발장치를 이용하여 해수의 온도별 포화증기압을 적용하여 증발량 실험을 한 결과 80 °C, -40 cmHg의 경우가 가장 많은 증발량을 나타내었으며, 해수의 농도에 따른 인자 실험의 결과에서는 농도가 짙을수록 증발량이 많이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 압력에 따른 인자 실험의 결과 낮은 압력에서 증발량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 결과적으로 증발량의 중요인자는 농도가 큰 부분으로 작용하였으며 다음 요인은 온도로 나타났으며 마지막 요인으로 압력을 들 수 있었다. 본 실험을 통하여 감압증발장치를 이용한 담수화 조건을 확인 할 수 있었다.

Abstract – Reduced pressure evaporation applies the principle of lowering water's boiling point by reducing the pressure. It uses the relation between temperature and pressure to reduce energy consumption needed for elevating temperature. As the result, the highest evaporation was observed at 80 °C and -40 cmHg applying saturated vapor pressure depending on different seawater temperature. It was found that the higher concentration in the factor test experiment depending on seawater concentration induced the higher evaporation. Also, in the factor test experiment, the amount of evaporation increased as the pressure decreased. It is concluded that the most important factor of evaporation was concentration, the second important factor was temperature, and the least important factor was pressure. Through this experiment, optimized conditions of desalination with reduced pressure evaporation device were verified.

Keywords: Deep Ocean Water(해양심층수), Reduced Pressure Evaporation(감압증발), Saturated Vapor Pressure(포화증기압), Boiling Point(끓는점), Concentration(농도)

1. 서 론

해양심층수란 태양광이 도달하지 않는 수심 200 m 이상의 깊은 곳에 존재하여 유기물이나 병원균 등이 거의 없을 뿐 아니라 연중 안정된 저온을 유지하고 있으며, 해양식물의 성장에 필수적인 영양염류가 풍부 할 뿐 아니라 생물(인체)의 구성원소와 유사한 조성을 하고 있는 해수(Kim[2002])로 정의 된다. 수심 200 m 이상에 부존

하는 해양심층수는 저온 안정성, 부영양성, 청정성 등의 자원적 특성을 가지고 있다. 최근에는 이러한 해양심층수를 활용하여 먹는 물로 만들어 상품화하는 사업이 활발히 이뤄지고 있다(Moon[2004]). 이러한 원인으로 우리나라는 강우특성, 지형여건, 국토공간조건과 사회적 여건에 따라 수자원을 이용해 나가고 있지만 대부분 지표수의 개발에 치우쳐서 지역간 물 분쟁, 지역사회의 반발, 날로 치솟고 있는 보상비의 상승, 댐 개발 적지의 부족과 도시화·공업화의 부산물인 오염 부하량과 그 종류 증가로 식수원의 위협받고 있다(MOCT[2001]). 이러한 대안으로 해수를 담수로 만드는 방법들이 제시되고 있다. 해양심층수(해수)를 담수화 하는데 많이 사용하고 있는 방법으로는 증발법과 막 투과법을 사용하고 있으며, 최근에는

[†]Corresponding author: 79hoji@kriso.re.kr

본 논문은 2013년 춘계 해양환경에너지학회에서 발표된 논문을 근거로 하고 있음을 밝힙니다.

막 투과법 중에 하나인 역삼투법이 경제성 및 효율적인 면에서 대표적으로 사용되고 있다. 역삼투법을 사용했을 경우 생기는 문제점 중에 하나는 생산과정에서 나오는 고농도의 농축수가 환경적으로 문제를 일으킬 수 있는 점이다. 해수담수화과정에서 생긴 농축수의 처리방안으로 가열증발 및 침지법 등과 같이 비교적 부담이 큰 방법으로 처리를 하기 때문에 보다 근본적인 농축수의 처리공정이 요구되는 실정이다(Kim[2012]). 이러한 해결 방안으로 본 연구에서는 증발법을 응용한 감압증발(Reduced Pressure Evaporation)장치를 사용하였다. 실험에 사용 된 감압증발장치는 자체 제작 되었으며, 기존의 증발장치에 비하여 낮은 소비전력을 사용하며 설비 또한 저가로 제작 되었다. 증발장치 중, 효율성 면에서 최근 많이 사용하고 있는 기계식 증기 재 압축(MVR)장치는 고가의 장비로, 현재 역삼투법을 사용하고 있는 대다수의 해수담수 생산업체에서 추가적인 담수와 제염을 목적으로 사용하기에는 부담이 클 것으로 사료되어 지며, 그 외의 증발장치(다단플래쉬 증발장치 등) 역시 고가의 장비일 뿐 아니라 효율 면에서도 부족 할 것으로 생각 되어 진다(Oh[2003]). 본 실험에 사용된 감압증발장치는 제염 및 담수 등을 얻기 위해 만들어진 장치로, 감압하여 물의 끓는점을 낮춰주는 원리로 제염 및 담수 공정에 소모되는 에너지를 줄일 수 있는 장치이다(Moon[2012]). 이를 활용하여 역삼투법 과정에서 생성 된 폐농축수를 사용하여 담수를 얻을 수 있었다. 이는 곧 버리는 자원의 재활용 및 환경문제를 해결 할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 해양심층수생산업체에서 나오는 폐농축수는 농도(염도)가 상이하며, 이에 따른 증발조건 값이 미비한 실정이다. 따라서 본 실험에서는 국내에서 해양심층수를 주로 사용하고 있는, 먹는 해양심층수 제조업체에서 나오는 폐농축수의 염도 범위인 4.5%~7%로 실험에 사용한 농축수의 농도 범위를 설정하였으며, 각 염도 별 온도에 따른 포화증기압을 사용하여 보다 정확한 실험값을 측정 할 수 있었다. 이러한 감압증발장치를 이용하여 에너지 절감효과와 폐농축수 활용 문제를 해결 할 수 있는 해수담수화 방법과 주요인자인 해수(농축수)의 농도, 온도 및 압력 등에 따른 담수조건을 확인 하였다.

2. 해수담수화 실험

2.1 실험 장치

Fig. 1과 2는 감압증발 실험장치의 개략도 및 실제 장치의 그림을 나타내고 있다. 실험장치는 펌프를 이용한 자동 순환식이며, 해양심층수(농축수)가 감압 농축기로 들어가 감압·가열되고 다시 순환되어 제염장치에 염이 쌓이고 증발된 수증기는 냉각기에 의해 응축되어 담수 저장탱크로 들어가게 구성되어 있다. 증발되어 없어진 해양심층수의 양 만큼 자동으로 해양심층수원수 탱크에서 해양심층수를 공급하도록 설계되었다.

감압증발장치 시스템은 크게 담수 생산 모듈(module)과 제염 모듈로 구성되어있다. 담수 생산 모듈은 원수탱크로부터 유입된 해양심층수가 감압·가열 챔버(chamber)로 들어가 가열되어 증기를 생성한다. 이때 생성된 증기는 배관을 따라 냉각장치로 이동하게 되

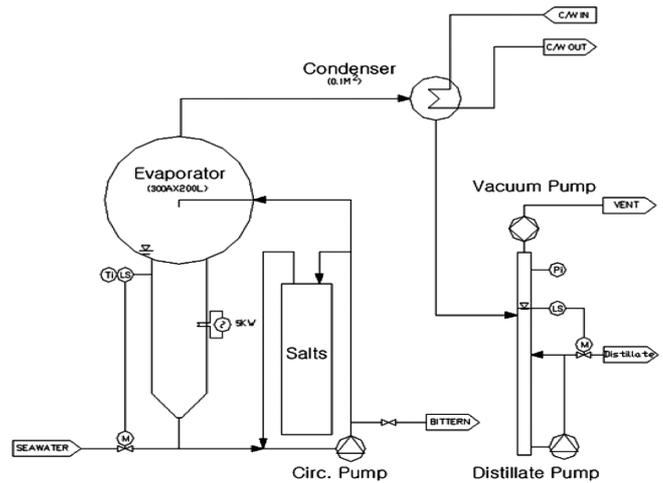


Fig. 1. Plan of reduced pressure evaporation.



Fig. 2. Reduced pressure evaporation device.

며 저온의 냉각수를 접하여 담수로 응축된다. 증기가 생성되면 챔버안의 해양심층수는 농도가 높아지게 되며 제염장치로 이동하여 염을 생성하게 된다. 생성된 염은 높이차이(중력)로 인하여 제염장치에 쌓이게 되며, 농축된 물은 다시 챔버로 이동하여 가열되어진다. 이때 증발된 수증기와 석출 된 염의 양이 일정량이 되면 원수 탱크에서 해양심층수가 추가적으로 유입되어진다. 이러한 일련의 순환 과정은 자동적으로 이뤄진다.

2.2 실험 방법

본 실험에서는 Fig. 3과 같이 온도에 따른 포화증기압을 사용하여 실험을 하였다(Mostafa H.[2010]). 온도에 따른 포화증기압을 사용하면 최적의 증발점을 활용 할 수 있을 것으로 예상한 실험이었다. 또한 압력, 온도 및 농도에 따른 인자 실험을 병행하여 진행 하였다.

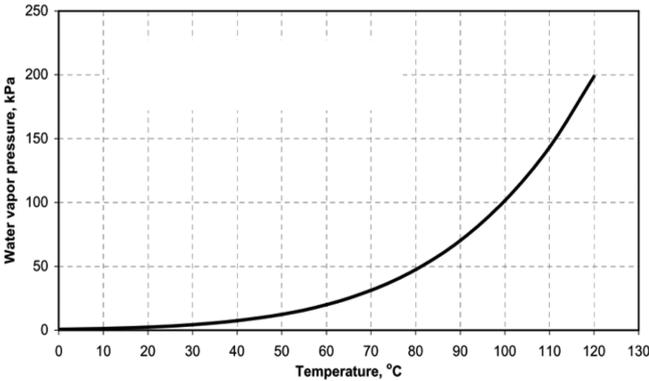


Fig. 3. Saturated vapor pressure in accordance with temperature change.

2.2.1 온도 변화에 따른 포화증기압 실험

염도 4.6%와 7%의 해양심층수를 사용하여 Fig. 3의 조건으로 온도, 압력을 사용하여 실험을 진행하였다. 증발된 증기의 응축을 위하여 냉각 장치를 사용하였으며, 냉각수의 온도는 8°C로 하였고, 30분 간격으로 담수 생산량을 측정하였다.

2.2.2 온도 변화 실험

염도 4.6%의 해양심층수를 사용하여 압력은 동일하게 -30 cmHg로 고정시키고, 온도를 70°C와 80°C로 차이를 두어 각각 실험을 진행하였다. 증발된 증기의 응축을 위하여 냉각 장치를 사용하였으며, 냉각수의 온도는 8°C로 하였고, 30분 간격으로 담수 생산량을 측정하였다.

2.2.3 압력 변화 실험

염도 4.6%의 해양심층수를 사용하여 온도는 동일하게 80°C로 고정시키고 압력을 -30 cmHg와 -40 cmHg로 차이를 두어 각각 실험을 진행하였다. 그리고 염도 7%의 해양심층수를 사용하여 온도는 80°C로 고정시키고 압력을 대기압과 -40 cmHg로 차이를 두어 실험을 진행하였다. 증발된 증기의 응축을 위하여 냉각 장치를 사용하였으며, 냉각수의 온도는 8°C로 하였고, 30분 간격으로 담수 생산량을 측정하였다.

2.2.4 열효율 계산

히터와 냉각기의 효율을 각각 히터봉만을 사용하였을 경우와 히터 봉과 진공펌프를 동시에 사용하였을 경우로 아래의 열효율 계산식을 이용하여 계산을 하였다. 먼저 필요열량(Q₁)은 식 (1)을 사용하여 계산하였다. 여기서 c는 온도에 따른 해수 비열값의 평균값을 적용하였으며, m은 사용한 해수의 양, T는 초기온도와 목적온도의 편차를 사용하였다. 그 외에 투입 열량은 가열시 투입열량(Q₂)과 냉각시 투입열량(Q₃)을 각각 식 (2)와 (3)을 이용하여 효율을 계산 할 수 있었다.

$$Q_1 = c \times m \times \Delta T \tag{1}$$

$$Q_2 = (\text{히터용량} \times \text{히터작동시간}) + (\text{진공펌프 용량} \times \text{진공펌프 작동시간}) \tag{2}$$

$$Q_3 = \text{냉각기용량} \times \text{냉각기작동시간} \tag{3}$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 온도 변화에 따른 포화증기압 실험 결과

Fig. 4는 온도 변화에 따른 포화증기압 실험으로 염도 4.6%와 7%의 해양심층수를 사용한 결과이다. 가장 많은 담수생산량을 나타낸 조건은 염도 7%를 사용하고 온도를 80°C로 했을 경우, 시간당 140 ml의 담수생산량을 얻을 수 있었고, 같은 농도에서는 온도가 증가 할수록, 같은 온도에서는 농도가 짙을수록 담수생산량이 증가함을 확인 할 수가 있었다. 또한 같은 압력에서도 농도가 짙을수록 담수생산량이 증가함을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 농도가 증가할수록 물 분자들의 수소결합능력이 약해지는 원리와 끓는점 오름 현상 등으로 포화증기압이 더욱더 증가하는 것으로 설명 될 수 있다.

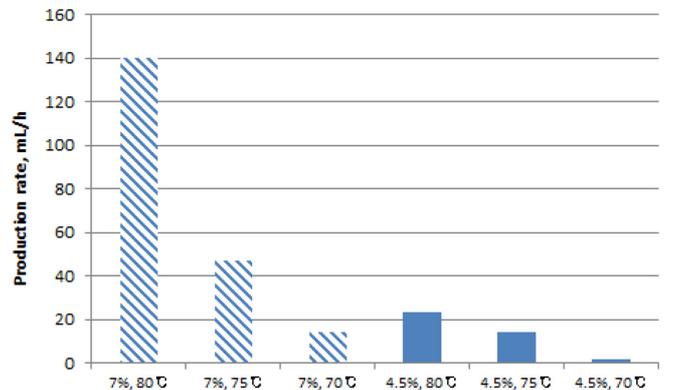


Fig. 4. The amount of fresh water according to changes in temperature and concentration using saturated vapor pressure.

3.2 온도 및 압력변화 실험 결과

압력 변화에 따른 실험으로 80°C의 같은 온도에서 압력을 -30 cmHg와 -40 cmHg로 차이를 두고 실험을 진행하였다. 그 결과 Fig. 5를 보면 압력이 낮을수록 담수생산량이 증가하였으나 그 차

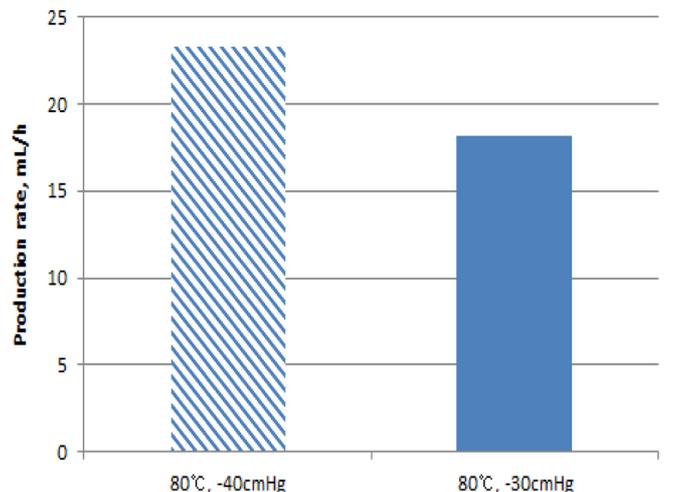


Fig. 5. The amount of fresh water as pressure changes.

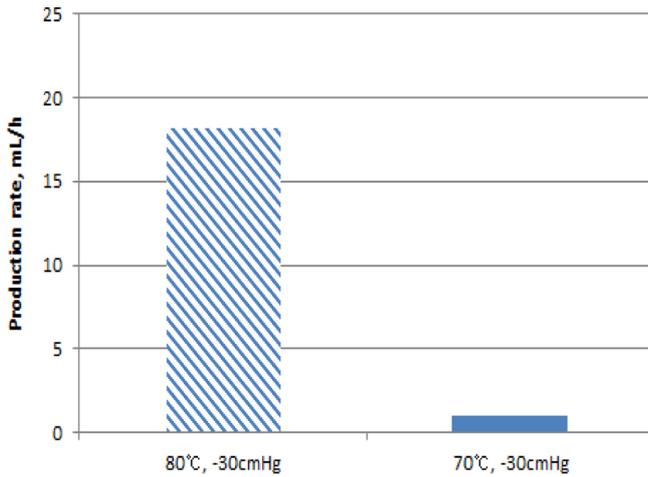


Fig. 6. The amount of fresh water as temperature changes.

이는 매우 적음을 알 수 있었다. 온도 변화에 따른 실험으로 -30 cmHg의 같은 압력에서 온도를 70 °C와 80 °C로 차이를 두고 각각 실험을 진행 하였다. 그 결과 Fig. 6를 보면 -30 cmHg 압력에서 70 °C의 결과는 시간당 1 ml의 담수생산량을 얻은 반면, 80 °C의 결과는 시간당 18.2 ml의 담수생산량을 얻을 수 있었다. 즉 온도가 높을수록 담수생산량이 증가하였음을 알 수 있었다.

3.3 압력 및 농도 변화 실험 결과

Fig. 5의 결과에서는 압력의 차이가 작아 단위시간당 5 ml 이하의 생산량 차이가 있었으나, Fig. 7에서는 80 °C 같은 온도에서 대기압인 7.6 cmHg와 -40 cmHg의 차이가 매우 커짐을 알 수 있었다. 또한 염도 7%, 7.6 cmHg의 결과에서는 12시간이내에 1 ml 이하의 담수생산량을 보이는 반면 농도가 낮은 염도 4.5%, -40 cmHg에서는 12시간에 280 ml의 담수생산량을 가짐을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 같은 온도에서 농도만 높다고 증발량이 많을 수는 없다는 결과이며, 적정 압력에서만 증발 효과 차이가 나타나는 것을 의미한다. 즉, 각각의 온도에 따른 포화증기압에서 증발량을 극대화 할 수 있다고 사료되어진다.

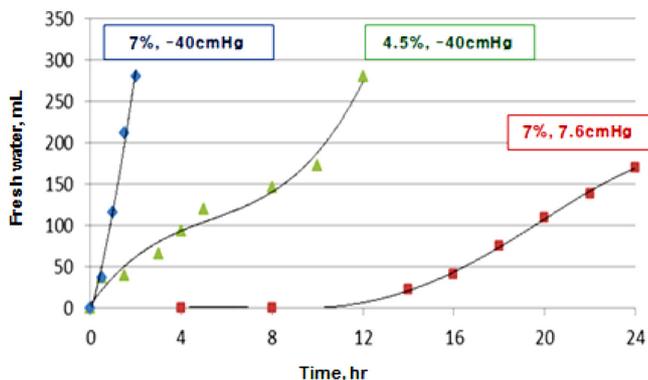


Fig. 7. Time and fresh water acquired for example (at 80 °C).

Table 1. Thermal efficiency

Condition	Heater	Heater + Vacuum
초기온도	20 °C	20 °C
목적온도	100 °C	80 °C
물량	10 kg	10 kg
비열	0.960 kcal/kg	0.959 kcal/kg
필요열량	768.1 kcal	576.1 kcal
	0.8933 kWh	0.6700 kWh
히터용량	3 kW	3 kW
히터작동시간	0.8 h	0.6 h
진공펌프 용량	0	0.75 kW
진공펌프 작동시간	0	0.0167 h
투입열량	2.40 kWh	1.81 kWh
효율(Heating)	37.2%	37.0%
냉각기 용량	2 kW	2 kW
냉각기 작동시간	0.5 h	0.3 h
투입열량	1 kWh	0.6 kWh
효율(Cooling)	89.3%	111.7%

3.4 열효율 계산 결과

히터와 냉각기의 효율을 각각 히터방만을 사용하였을 경우와 히터방과 진공펌프를 동시에 사용하였을 경우로 Table 1과 같이 열효율 계산식을 사용하여 이론적인 계산을 하였다.

Table 1의 조건을 가지고 히터방만을 사용하였을 경우와 히터방과 진공펌프를 동시에 사용하였을 경우를 식 (1)~(5)의 열효율 구하는 식을 이용하여 구하였다. 초기온도는 동일하게 20 °C로 설정했으며 목적온도는 히터방만을 사용했을 경우 물의 끓는점인 100 °C, 히터방과 진공펌프를 동시에 사용했을 경우는 본 실험에서 가장 많은 담수생산량을 얻은 80 °C로 설정하였고, 비열은 해수의 온도에 따른 비열 값을 각각 적용하였다. 그 외 물량, 히터-진공펌프-냉각기의 용량 및 작동시간 등은 실험적인 결과를 적용하여 계산하였다. 위의 계산결과를 통하여 가열 시 효율은 히터방만을 사용하였을 경우 37.2%의 효율을 얻었으며 히터방과 진공펌프를 동시에 사용하였을 경우 37.0%의 효율을 얻어 두 결과가 거의 유사하게 나왔다. 반면에 냉각 시 효율에서는 히터방과 진공펌프를 동시에 사용하였을 경우 111.7%의 효율로 히터방만을 사용했을 때의 효율 89.3%보다 월등히 높게 나옴을 알 수 있었다. 이러한 결과는 고열원이 필요로 하는 증발장치에서 에너지 소비량을 줄일 수 있는 결과라고 생각되어진다.

3. 결 론

본 연구는 감압증발장치를 이용하여 담수조건을 확인하고자 여러 가지 인자 시험을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 실험결과 가장 많은 담수생산량을 나타낸 염도 7%, 온도 80 °C 및 압력 -40 cmHg의 결과와 다른 조건의 결과들을 비교했을 때, 같은 온도에서는 농도가 짙을수록, 압력은 낮을수록 담수생산량이 증가하고, 같은 농도에서는 온도가 증가 할수록, 압력은 낮을수록 담수

생산량이 증가함을 확인 하였으며, 같은 압력에서는 온도는 높을수록, 농도는 증가 할수록 담수생산량이 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 담수화 과정에서의 중요 인자를 확인 할 수 있었다. 중요 인자로는 농도를 들 수 있었고 다음은 온도이며 마지막으로 압력이 감압증발장치에서의 담수화 조건에 영향을 주는 것으로 확인 할 수 있었다. 또한 증발장치에 압력을 감소시켜 끓는점을 낮게 해 주는 것이 증발장치만을 사용했을 때 보다 경제적으로 유리 할 수 있는 계산 결과를 얻을 수 있었다. 결과적으로 해수의 농도, 온도 및 압력을 적절하게 활용하면 담수생산량의 향상과 에너지절감효과를 가져올 것으로 기대 할 수 있다. 또한 농도가 높을수록 담수생산량이 증가하는 실험결과 등을 활용하여, 기존에 담수화공정에서 버려져왔던 고농도의 폐농축수를, 감압증발장치를 활용하여 담수와 제염으로 추가적인 생산물을 얻을 수 있게 되어, 폐자원을 활용 할 수 있는 부분과 환경문제 개선 부분에도 많은 도움을 줄 것으로 사료되어진다. 따라서 본 연구를 통하여 감압증발장치를 이용한 담수화 조건 및 응용 가능성에 대하여 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 해양수산부가 지원하는 ‘해양심층수 산업지원 기술 개발’ 및 ‘해양심층수의 에너지 이용 기술 개발’ 과제 성과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Deoksoo Moon etc., 2004, “features of deep ocean water and underground salt water”, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering Vol.7, No.1, pp. 42-46.
- [2] Deoksoo Moon etc., 2012, “Characteristics of mineral salts production and separation from deep ocean water using reduced pressure evaporation”, Annual Autumn Meeting of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, 369.
- [3] Hyeon-Ju Kim etc., 2002, “multi-purpose development of deep ocean water (2)”, Vol. 7, No. 1, pp. 30-34.
- [4] Il-Whee Kim etc., 2012, “A Study on Application of SBR Process for RO Retentate Treatment”, Journal of Korean Society of Environmental Engineers Vol.34, No.2, pp. 79-85.
- [5] Jong-Sik Oh etc., 2003, “Development of Turbo Steam Compressors for MVR System”, Journal of the Korean Society for Fluid Machinery Vol.12, pp. 482-486.
- [6] Ministry of Construction & Transportation, 2001, “Water Vision 2020”.
- [7] Mostafa H. etc., 2010, “Thermophysical Properties of Seawater”, A Review of Existing Correlations and Data, Desalination and Water Treatment.

2013년 9월 30일 원고접수

2013년 11월 18일(1차), 2014년 2월 18일(2차) 심사수정일자

2014년 2월 19일 게재확정일자