

정수압방식 동력회수장치의 구동동력 절감량 해석

An analysis on power regeneration of hydrostatic pressure exchanger

함영복 · 최준혁 · 정헌술 · 박상진 · 박중호 · 윤소남

Y. B. Ham, J. H. Choi, H. S. Jeong, S. J. Park, J. H. Park and S. N. Yun

Key Words : Water Hydraulic(수압), Piston Pump(피스톤 펌프), RO Membrane(역삼투식 분리막), Brine(배출농축수), Hydrostatic(정수압), Pressure Exchanger(압력회수기), Desalination(담수화)

Abstract: This paper presents an energy saving hydrostatic pressure exchanger for sea water desalination equipment. In a reverse osmosis(RO) system for desalinating sea water, more than 70 percent of the supplied sea water, brines which were impassable through RO membrane are bypassed, resulting in high energy losses. In this paper, a hydrostatic pressure exchanger consisting of an embedded water hydraulic piston motor and a water hydraulic piston pump was proposed and investigated in order to recover the energy of the bypassed brines. The pressurized brines are supplied to the embedded water hydraulic piston motor as power sources and the water hydraulic piston pump is driven by the output torque of the embedded water hydraulic piston motor as well as electric motor. Consequently, the energy of the bypassed brines can be recovered. To examine the electric energy saving characteristics of the hydrostatic pressure exchanger, a simulation model was constructed using commercial software and experiments were conducted. Through the results of simulation and experiment, the feasibility of the electric energy saving effect of the proposed hydrostatic pressure exchanger was investigated.

기호 설명

- k_w : 물 투과계수 (permeability coefficient for pure water)
 k_s : 염 확산계수 (permeability coefficient for salt)
 p : 공급압력 (supply pressure)
 $\Delta\pi$: 해수삼투압 (osmotic pressure)
 C : 공급해수의 농도 (concentration of seawater)
 C_p : 생산수의 농도 (concentration of pure-water)
 Q_p^n : 투과 생산수량 (permeate flow rate)
 C_p^n : 투과 생산수 농도 (permeate concentration)
 dA : 투과 면적 (membrane area control volume)
 C_f^n : 불투과 해수농도(upwind scheme)

1. 서 론

1950년대부터 중동지역을 중심으로 활용되어 온 담수화 기술은 1980년대까지는 증발법이 주류를 이루었으나, 역삼투식 분리막기술이 급속히 발전하면서 1990년대 이후에는 역삼투법이 설치대수 측면에서 우위를 점하고 있다. 역삼투법은 선택적 투과막을 이용하여 삼투압 이상의 압력을 해수에 가해 음용수를 생산한다.¹⁾ 국내에서도 이미 역삼투식 (Reverse Osmosis: RO)분리막은 국산화가 이루어졌으나, 나머지 주요 기계구성품은 수입에 의존하고 있다. 아직까지는 증발법에 의한 음용수 생산이 생산량적 측면에서 우세함을 보이고 있으나, 증발법을 이용한 담수생산설비는 규모가 크고, 화석에너지를 사용함으로 점차 쇠퇴할 것이다. 도서지역과 원양선박, 군함, 고급 요트 등에서는 이미 중·소형의 역삼투식 담수화장비가 설치되어 음용수를 생산하고 있으며, 현재 대부분의 중·소형 담수화장비는 외국제품이 사용되고 있다.²⁾ 에너지절약 측면에서도 증발법에 비해 50% 이상 에너지절약이 가능한 역삼투법 담수화 기술은

접수일 : 2007년 7월 16일

함영복(책임저자) : 한국기계연구원 나노기계연구본부

E-mail : hyb665@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7157

정헌술 : 군산대학교 기계공학부

박상진 : 한국기계연구원 에너지기계연구본부

윤소남, 박중호, 최준혁 : 나노기계연구본부

선진국을 중심으로 다양한 담수화장치의 개발이 진행되고 있다. 그러나 증발법과 비교하여 에너지절약 효과가 높은 역삼투법의 경우도 역삼투식 분리막을 통과하지 못한 70%정도의 가압된 유체를 탱크로 회유시킴으로서 많은 에너지를 낭비하고 있는 현실이다.^{3,4)}

Fig. 1은 일반적인 역삼투식 담수화장치의 구조이며, Fig. 2는 본 연구에서 제안한 버려지는 배출농축수의 압력을 회수하는 압력회수기를 부착한 역삼투식 담수화장치의 시스템 개념도이다.⁵⁾

Fig. 1과 2에서 배출 농축수(brine)는 분리막을 통과하지 못한 압력유체로 염도가 45000ppm 정도로 높아진 배출농축수를 의미한다.⁴⁾

배출농축수의 압력을 이용하여 유압모터를 구동하고, 이렇게 생성된 유압모터의 토크동력을 유압펌프의 구동에 사용하여 소비동력을 절감시킬 수 있는 정수압방식의 압력회수기(hydrostatic pressure exchanger)를 구현할 수 있다.

역삼투식 담수화장치의 경우, 소형·휴대형 담수화장치로 주로 사용되는 현실을 감안하여 담수화장치에 무게와 부피 증가는 피하는 것이 바람직하며, 해수를 삼투압 이상으로 가압하기 위한 고압펌프의 경우, 기존의 플런저 펌프 및 다단 원심펌프는 맥동이 심하고 효율이 낮다는 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 1일 최대 생산량 5~10톤 규모의 에너지 회수형 역삼투식 담수화장치의 부착될 압력회수기의 구동동력 절감량 해석을 목표로 한다.

본 연구에서 제안하는 압력회수기의 메카니즘은 기존의 사판식 수압 피스톤 펌프에 구동축에 수압 피스톤 모터가 일체화되어 있는 구조이다. 수압 피스톤 펌프의 보조 구동원으로 사용되는 수압 피스톤 모터는 회수된 배출농축수의 배출압력에 의해 구동되고, 이 수압 모터의 출력축을 수압 펌프의 구동축과 직접 연결시켜 펌프 구동 동력의 일부로 사용함으로써, 버려지는 압력에너지를 회수하여 펌프 구동의 주 동력원인 전기 모터의 소비동력을 절감할 수 있는 구조로 되어 있다.

본 논문에서는 펌프-모터 일체형 압력회수기의 메카니즘을 제안하고, 압력회수기를 통해 절감되는 동력량을 검토하기 위하여 상용 해석 프로그램인 AMESim®과 MATLAB/Simulink를 이용한 절감량 해석모델을 구축하였다. 또한, 유압시스템을 이용한 실험 장치를 구성하고 실험을 통하여 압력회수기의 동력 절감 메카니즘을 검증하였다.

2. 압력회수기 메카니즘

역삼투식 해수담수화장치는 역삼투 분리막(RO membrane)의 특성상 투과생산수(permeate water)보다 2~3배 많은 원수(seawater)의 공급을 필요로 한다. 그 이유는 역삼투 분리막에 투과생산수량 만큼의 원수만을 공급할 경우 역삼투 분리막을 통과하지 못한 염분과 슬러지가 분리막에 쌓여 담수화장치가 제 기능을 못하게 되기 때문이다. 현재 상용화된 역삼투 분리막의 경우 제품에 따라 차이를 보이기는 하나 투과생산수의 2~3배 정도의 원수를 공급하는 것이 일반적이다.



Fig. 1 Schematic diagram of a conventional sea water desalination system

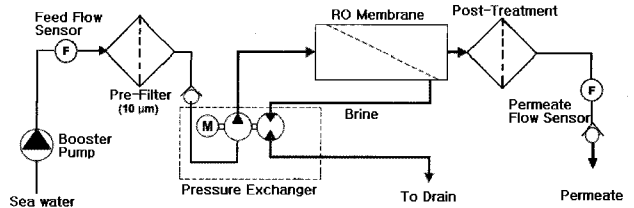


Fig. 2 Configuration of reverse osmosis desalination system using pressure exchanger

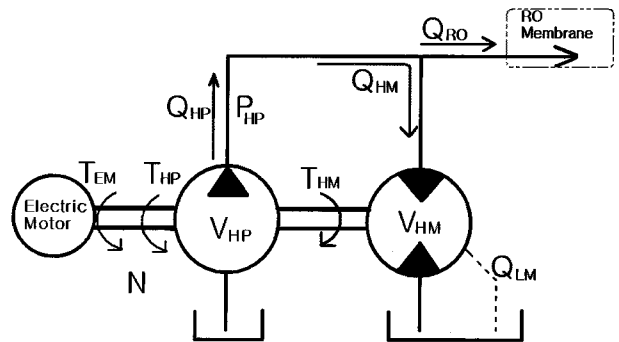


Fig. 3 Circuit diagram of hydrostatic pressure exchanger

역삼투식 해수 담수화장치의 경우 해수의 삼투압

이 60bar정도인데, 60bar로 가압된 원수 중 60~75%를 버림으로써 많은 압력에너지를 낭비하고 있는 것이다. Fig. 3은 본 연구를 통해 검증하고 개발하고자 하는 압력회수기의 시스템 회로도이다.

압력회수기의 메카니즘이 성립하기 위해 일정한 체적용량을 갖는 사판식 피스톤 펌프를 적용하였으며, 사판식 피스톤 모터를 적용함으로써, 버려지는 압력에너지의 회수율을 높이고, 그 결과로서 해수담수화장비 동력효율을 높일 수 있으며, 기존의 원심펌프와 플러저펌프를 적용한 경우에 비하여 보다 컴팩트한 구조를 갖게 된다.

3. 시스템 모델링

압력회수기 시스템에 있어서 동력절감량을 검토하기 위하여 역삼투 분리막의 수학적 특성을 먼저 파악하였다. 식 (1)은 투과생산수의 유동을 의미하며, k_w 는 삼투막 투과계수, p 는 공급압력, $\Delta\pi$ 는 해수의 삼투압 이다. 식 (2)는 염수 유동을 의미하며, k_i 는 삼투막 염누출상수, C 와 C_p 는 각각 공급원수와 투과생산수의 농도를 의미한다. 식 (3)은 해수삼투압 $\Delta\pi$ 에 관한 식이다.^{4),5)}

$$\text{Water flux } J = k_w (p - \Delta\pi) \quad (1)$$

$$\text{Solute flux } J_i \equiv C_p J = k_i (C - C_p) \quad (2)$$

$$\text{Osmotic pressure } \Delta\pi = 0.0779 (C - C_p) \quad (3)$$

식 (1)~(3)에서 역삼투 분리막을 통과하는 유체유

동과 염수유동, 삼투압을 계산하였고, 식 (1)과 식 (3)에서 식 (4)를 얻을 수 있으며, 이를 바탕으로 투과생산수의 유량 Q_p^n 과 농도 C_p^n 를 식 (5)와 식 (6)을 통해 구할 수 있다.^{4),5)}

Permeate flow-rate

$$J = k_w [p - 0.0779 (C - C_p)] \quad (4)$$

$$Q_p^n = k_w \cdot dA [p - 0.0779 (C_f^n - C_p^n)] \quad (5)$$

Permeate concentration

$$C_p^n = \frac{k_i \cdot dA \cdot C_f^n}{Q_p^n + k_i \cdot dA} \quad (6)$$

위의 식 (1)~(6)을 바탕으로 하여 삼투막의 특성 함수를 MATLAB/SIMULINK 모델로 구축하였고, Fig. 4는 구축된 역삼투 분리막의 함수모델이다.

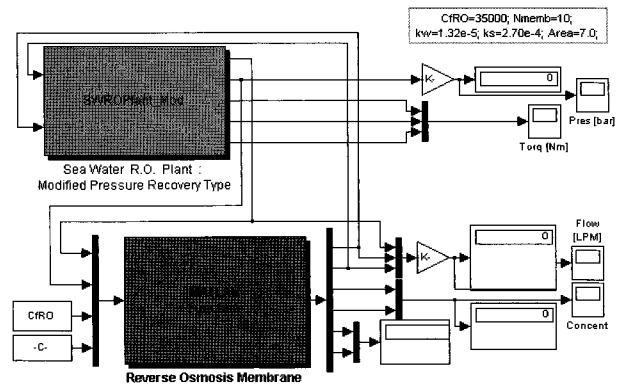


Fig. 4 SIMULINK model of the RO-membrane

해수담수화장비의 모델링 과정에서 역삼투 분리막

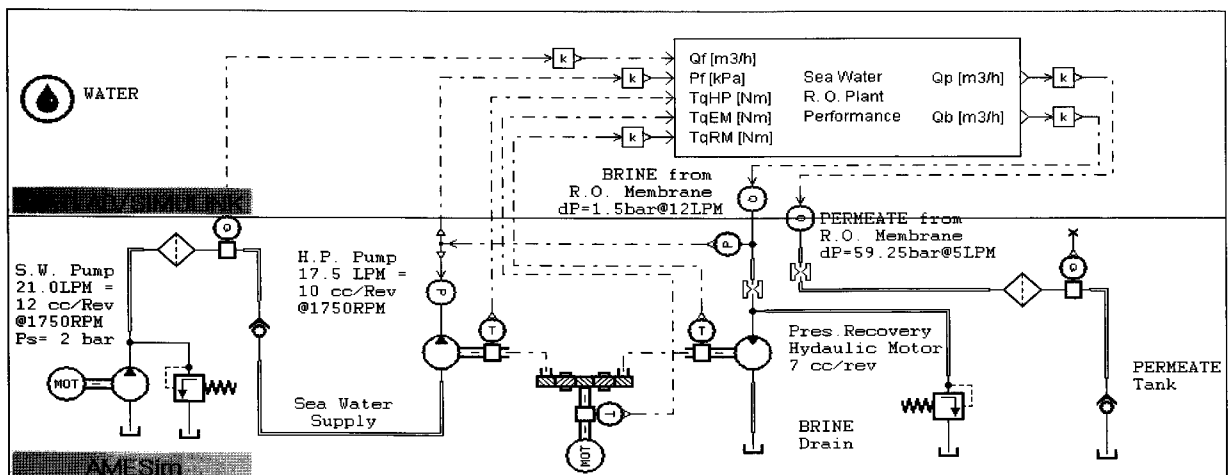


Fig. 5 AMESim model of the RO desalination system using pressure exchanger

을 제외한 해수공급펌프, 피스톤 펌프와 피스톤모터, 담수필터 등의 구성회로는 AMESim®을 이용하여 구축하였다. 두 상용프로그램을 연동하면 Fig. 5와 같은 시스템 모델을 구축할 수 있다.

Fig. 5에서와 같이 압력회수기를 통한 구동동력 절감량을 해석하기 위하여 펌프와 모터를 전동기의 구동축에 직결한 구조이며, 피스톤펌프·모터이외의 적용되는 요소부품들의 효율과 운동특성은 고려하지 않았다.

작동유체의 물성치는 일반적인 해수의 물성치를 적용하였다. 시뮬레이션에 적용한 수압 펌프, 수압 모터 및 역삼투식 분리막의 시스템 변수를 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1 System parameters

Parameters	Value
k_w (permeability coefficient for pure water)	$1.32 \times 10^{-5} [\text{m}/(\text{hr} \cdot \text{kPa})]$
k_s (permeability coefficient for salt)	$2.70 \times 10^{-4} [\text{m}/\text{h}]$
P_{HP} (supply pressure)	60 bar
$\Delta\pi$ (osmotic pressure)	58 bar
C (concentration of seawater)	35,000 [ppm]
C_p (concentration of pure-water)	400 [ppm]
permeate area of RO-membrane	7.0 [m^2]
water hydraulic pump	10cc/Rev \times 1750RPM=17.5LPM
water hydraulic motor	8.0cc/Rev \times 1750RPM=14.0LPM
pressure drop (sea water \rightarrow brine)	150 kPa @ 12 LPM
pressure drop (sea water \rightarrow pure water)	5,925 kPa @ 5 LPM
pressure drop of sea water pre-filter	0.2 bar @ 20 LPM
pressure drop of sea water post-filter	0.1 bar @ 5 LPM
efficiency of pump and motor	$\eta_v = 1, \eta_m = 1$

4. 시뮬레이션

펌프-모터 일체형 압력회수기 메카니즘의 타당성을 검토하기 위하여 Table 1에 정리된 변수들을 적용하여 수압펌프의 용량을 10cc/rev로 수압모터의 용량을 8 cc/rev로 하고, 펌프와 모터의 체적효율과 기계효율이 $\eta_v = 1, \eta_m = 1$ 일 때 시간에 따른 각 구동요소의 토크값 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

시뮬레이션 결과 수압모터의 회생토크로 인하여 전기모터 구동 토크가 현저히 작아짐을 확인하였다. 또한, 수압모터의 용량과 압력회수기의 동력 절감량

은 비례함을 알 수 있다. 그러나 일정한 투과생산수를 얻기 위해서는 역삼투식 분리막으로 공급되는 유량은 일정하게 유지 되어야한다. 따라서 수압모터로 공급되는 유량과 역삼투식 분리막으로 공급되는 유량의 합이 수압펌프의 공급유량을 넘을 수 없게 된다.

본 연구에서 제안한 펌프-모터 일체형 압력회수기는 수압 펌프와 수압 모터가 하나의 구동축에 연결되어 있기 때문에 모터의 용량이 지나치게 클 경우 수압 모터는 전기모터의 부하로 작용되게 되며, 반대로 너무 작을 경우는 역삼투식 분리막에 과부하를 주게 되어 전체 시스템 효율을 저하시키는 원인으로 작용한다.

일정한 담수를 생산하면서 가장 높은 동력 절감효과를 얻을 수 있는 수압모터의 용량을 계산하기 위하여 수압모터 용량 변화에 따른 구동요소 각 부분의 소요동력을 시뮬레이션 하여 Fig. 7에 나타내었다.

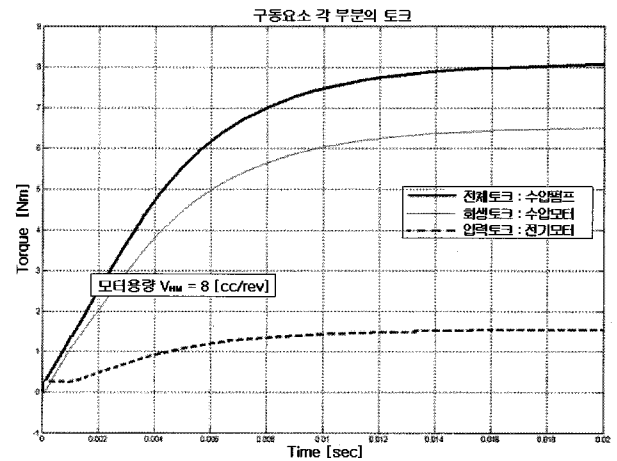


Fig. 6 Variation of torques

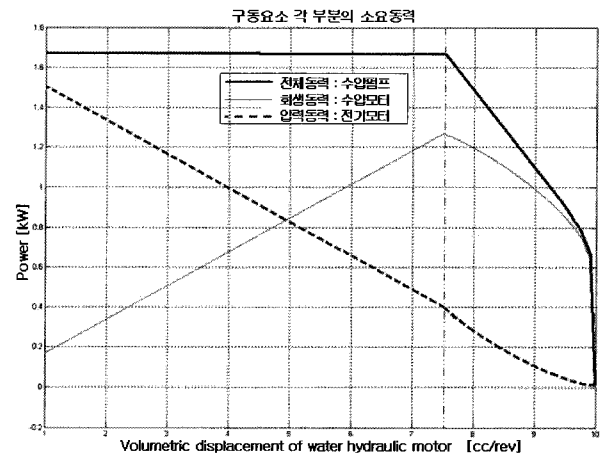


Fig. 7 Variation of power on volumetric displacement ($\eta_v = 1, \eta_m = 1$)

수압모터의 용량이 약 7.6cc/rev에서 수압모터의 회생동력이 가장 많았으며, 모터에 용량이 7.6cc /rev 이상으로 커지면 회생동력이 감소하고, 시스템이 불안정해짐을 알 수 있다.

해수담수화 시스템에 보다 근접한 시뮬레이션을 위하여 수압 펌프와 모터의 체적효율과 기계효율을 90%로 설정하여 시뮬레이션하면 Fig. 8과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 7과 동일한 조건하에서 수압펌프와 모터의 효율을 낮게 설정할 경우 ($\eta_v = 0.9, \eta_m = 0.9$) 수압모터의 회생토크곡선이 모터의 용량 약 5.8cc /rev을 경계로 감소하므로 수압모터의 설계용량을 5.8cc/rev 이하로 설정하는 것이 바람직하다. 즉, 수압펌프와 모터의 체적효율과 기계효율이 수압모터 용량 결정에 있어서 중요한 인자임을 알 수 있다.

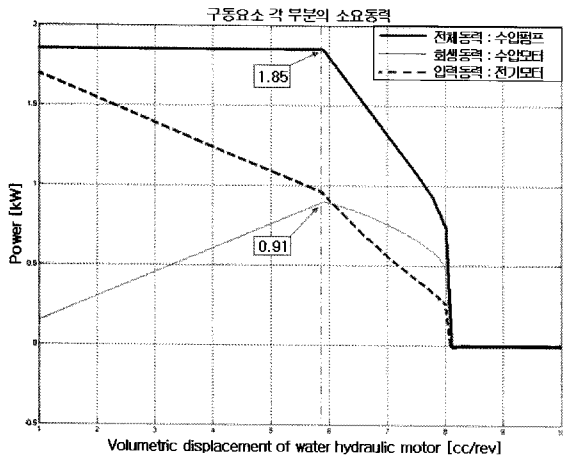


Fig. 8 Variation of power on volumetric displacement ($\eta_v = 0.9, \eta_m = 0.9$)

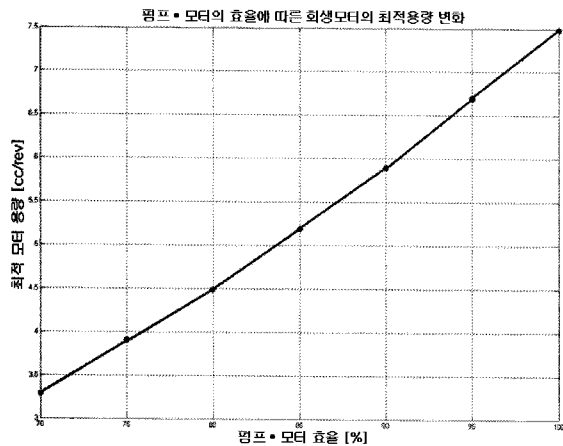


Fig. 9 Volumetric displacement of water hydraulic motor for maximum power regeneration on efficiency variation

압력회수기를 부착한 역삼투식 해수 담수화시스템에서 소요동력을 최소화할 수 있는 수압 펌프·모터의 효율에 따른 수압모터의 최적 체적용량을 시뮬레이션한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

전기모터 소비동력의 경우 수압펌프만을 구동할 때 필요한 동력 1.85 [kW]에서 수압모터 회생토크에 의해 0.91 [kW]의 동력이 절감되어 약 49% 정도의 소비동력 절감효과를 낼 수 있을 것으로 계산되었다.

5. 실험

시뮬레이션을 통해 소비동력 절감을 확인할 수 있었고, 이를 검증하기 위해 해수용 펌프와 모터 대신 동일 사양의 유압 피스톤 펌프와 모터를 이용하여 Fig. 10과 같은 실험 장치를 구성하였다.

유압펌프와 유압모터의 동력구동축은 타이밍 벨트를 이용하여 연결하였으며, 유압펌프와 유압모터의 용량 및 설정값은 시뮬레이션에서 적용한 Table 1의 값들과 동일하게 설정하였다. 펌프와 모터의 효율은 각각 $\eta_v = 0.9, \eta_m = 0.9$ 로 가정하고 이때 유압펌프의 체적용량은 시뮬레이션수행결과를 바탕으로 10cc/rev, 유압모터의 체적용량은 6.8cc/rev로 설정하였다. 이를 유압회로로 나타내면 Fig. 11과 같다.

전력계(power meter)를 이용하여 전기모터 구동용 인버터로 공급되는 전력량을 측정하였으며 설정압력 60bar, 회전속도 1200rpm의 구동조건에서 유압펌프만을 구동하는데 소요되는 동력량과 유압모터로 압력을 회수할 경우 소요되는 동력량을 측정하여 비교하였다.

측정결과 Fig. 12와 같이 펌프만 구동할 때의 동력과 비교하여 압력회수기를 적용한 경우 소요동력 감소를 확인하였으며, 해수의 삼투압(60bar)에서의 동력 절감량을 확인할 결과, 소비동력이 1.94 [kW]에서 1.26 [kW]으로 약 35%정도의 동력 절감이 확인되었다.

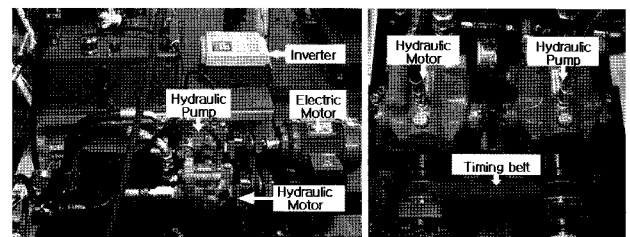


Fig. 10 Experimental apparatus for pressure exchanger characteristics

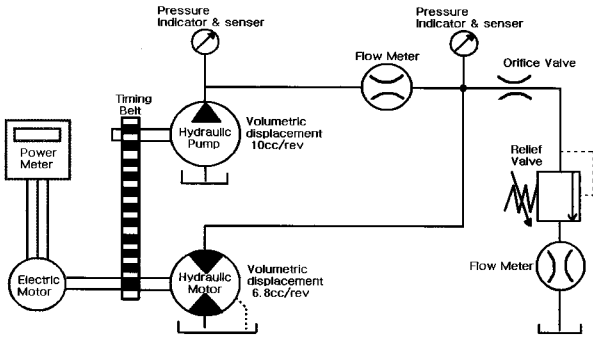


Fig. 11 Circuit diagram of experimental setup

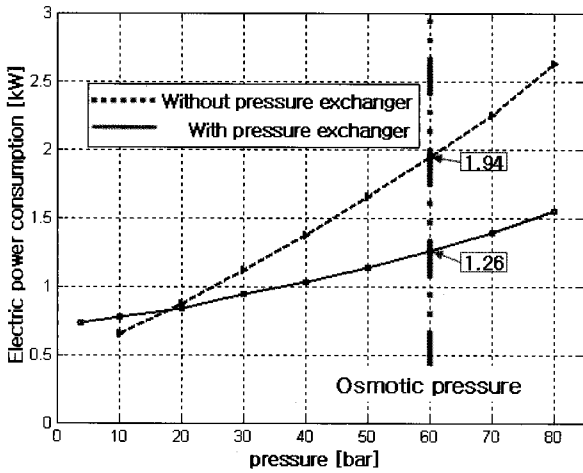


Fig. 12 Test results of the experiment with/without pressure exchanger

6. 결 론

본 연구에서는 1일 최대 생산량 5톤 규모의 에너지 회수형 역삼투식 담수화장치의 개발을 위하여 배출농축수의 배출압력을 회수하여 구동원으로 사용하는 수압 모터를 내장한 콤팩트한 정수압방식의 압력 회수장치를 제안하였다. 제안된 압력회수기 메카니즘의 실현가능성을 검토하기 위하여 시뮬레이션 모델을 구축하고, 실험 장치를 통해 시뮬레이션 결과를 검증해 보았다.

시뮬레이션 수행 결과 수압 펌프와 모터의 효율이 각각 $\eta_p = 0.9$, $\eta_m = 0.9$ 일 때 수압모터의 적합한

체적 용량은 6.8 cc/rev인 것으로 나타났으며, 시뮬레이션을 통해 계산된 압력회수기를 이용한 전기모터 구동동력 절감량은 약 49%로 계산되었다.

시뮬레이션 결과로 얻은 동력 절감율 49%와 실험을 통해 실제 전기모터 구동 소비동력 절감율 35% 간의 차이는 시뮬레이션에서 고려되지 않았던 압력 매체(물 또는 오일), 관로저항, 릴리프밸브, 전기모터의 효율 등에 의한 오차로 판단되어진다.

향후 과제로서는 시뮬레이션결과를 바탕으로 압력회수기 구동용 전기모터의 소비동력을 최소화할 수 있는 수압모터의 배제용적을 결정하고, 오일이 아닌 해수를 이용한 실험결과를 바탕으로 그 결정결과를 검토 할 예정이다.

후 기

본 연구는 에너지·자원기술개발사업 “고압에너지 회수형 콤팩트 역삼투식 해수담수화장치 개발”과제의 일부이며, 관계자 여러분께 감사료를 드립니다.

참 고 문헌

- 1) 김상현, 김동국, 전원표, “MVRS해수담수화 및 제염기술”, 기술혁신학회, 춘계학술 세미나, pp. 285~302, 2001.
- 2) 최병습, “해수담수화 후보지역 조사”, 한국농공학회 학술대회지, pp. 325~330, 1998.
- 3) 최광호, “막분리공정을 이용한 해수담수화”, 한국막학회 학술대회지, pp. 57~81, 1993.
- 4) Hans-Gunter Heitmann (1990). Saline water processing-Desalination and treatment of seawater, brackish water, and industrial waste water, VCH Verlagsgesellschaft mbh, Weinheim.
- 5) Park, S.-J. and Liu, C.C.K., “Experiment and Simulation of a Wind-Driven reverse Osmosis Desalination System,” Water Engineering Research, Vol.4, No.1, pp. 1~17, 2003.