역삼투 담수시스템용 에너지회수장치의 손실극복 메커니즘 설계
Design of Loss-reduction Mechanisms for Energy Recovery Devices in Reverse-osmosis Desalination systems

함영복*† · 김 영* · 노종호** · 신석신** · 박종호***
Y. B. Ham*†, Y. Kim*, J. H. Noh**, S. S. Shin**, and J. H. Park**

(접수일 : 2011년 04월 11일, 수정일 : 2011년 06월 14일, 채택확정 : 2011년 06월 16일)

Key Words : Energy Recovery Device(에너지회수장치), Loss-reduction mechanism design(손실극복 메커니즘 설계), Reverse osmosis(역삼투), Desalination(담수화)

Abstract : Novel mechanisms for Energy Recovery Devices are proposed to diminish the pressure loss in the high-pressure reverse-osmosis system. In the beginning, the state-of-the-art in the design of Energy Recovery Devices is reviewed and the features of each model are investigated. The direct-coupled axial piston pump(APP) and axial piston motor(APM) showed 39% energy recovery at operating pressure of reverse osmosis desalination systems, 60 bar. Meanwhile, the developed PM2D model, in which APM pistons are arranged parallel to those of APP, is more compact and showed higher efficiency in a preliminary test. Loss-reduction mechanisms employing rod piston and double raw valve port are additionally proposed to enhance the efficiency and durability of the device.

1. 서 론

최근 인구 증가와 기후 변화로 인해 물 부족 현상이 심해지면서 중동 지역을 중심으로 전 세계에서 담수화 설비의 수요가 증가하고 있다. 그 중에서도, 증발식에 비해 훨씬 적은 에너지를 사용하는 역삼투식 담수화 시스템의 수요가 크게 늘어나고 있다.

역삼투식 담수화법은 고압의 에너지를 가해 주어 해수 중의 물이 삼투막을 투과하여 해수의 반대쪽으로 이동하도록 하여 담수를 생산하는 방법이다. 해수에 고압을 가하는 펌프의 사용에 드는 전기 에너지가 전체 운전비용의 30~50%를 차지하므로, 역삼투식 담수화 시스템의 효율에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나는, 삼투막을 투과하지 못하고 배출되는 농축수(brine water)의 고압에너지를 회수하는 에너지회수장치(ERD: Energy Recovery Device)의 효율이다. 회수된 에너지는 다시 해수를 가압하는 데 사용할 수 있으므로, 에너지 소비가 적은 담수화 시스템의 개발을 위하여 고압 에너지의 손실을 최소화하여 시스템 전체의 효율을 높일 수 있는 에너지회수장치의 개발이 중요하다. 본 논문에서는 역삼투식 담수화 장치에 사용할 수 있는 에너지회수장치의 종류와 특징을 이해해 보고, 새로운 고효율 에너지회수장치로서 일체형 ERD와 이를 위한 손실극복 메커니즘을 제안한다.

2. 에너지회수장치의 종류와 특징

에너지회수장치는 크게 두 종류로 나눌 수 있는데, 터빈방식 또는 수차방식의 유체기계방식과, 왕복동식

*함영복(교신저자): 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부
E-mail : hyb665@kimm.re.kr, Tel : 042-848-7157
*김영 : 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부
**노종호, 신석신 : 충남대학교 대학원 기계공학과
***박종호 : 충남대학교 기계공학과

*Y. B. Ham(corresponding author) : Environmental and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials.
E-mail : hyb665@kimm.re.kr, Tel : 042-848-7157
*Y. Kim : Environmental and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials
**J. H. Noh, S. S. Shin, ***J. H. Park : Department of Mechanical Engineering, ChungNam National University.

또는 회전·용적식(positive displacement, Isobaric)으로 나뉜다. 유체기계방식 에너지회수장치는 농축수의 운동에너지에 의해 기계에너지 또는 전기에너지로 변환하여 해수공급 고압펌프구동에 회수되는 반면, 용적식은 제한된 체적의 변화를 이용하여 직접 구동되므로 효율이 높다.[1)]

용적식 에너지회수장치 중 왕복동식은 해수와 농축수가 피스톤 또는 플런저에 의해 분리되어 구동되지만, 장치가 크고 피스톤의 마찰에 의한 손실과 방향전환 밸브, 체크밸브를 통한 유동압력 손실이 일어나는 단점이 있다. 이것과는 상대적으로, 회전식으로 구동되는 장치들은 크기가 작으면서도 회전수를 높임에 따라 많은 유량을 처리할 수 있어 중소형 시스템에서유리하다. 현재 상용화된 회전식 에너지회수장치는 ERI사의 PX가 있다. PX의 메커니즘은 Fig. 1에 나타낸바와 같이 한 개의 실린더 블록 안에서 해수와 농축수가 직접 접촉하여 압력 교환을 하므로, 해수와 농축수의 혼합이 일어나 담수 효율이 떨어질 수 있다.

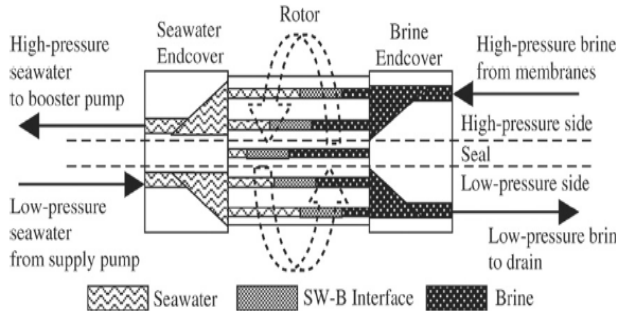

Fig. 1 PX flow schematic[2)]

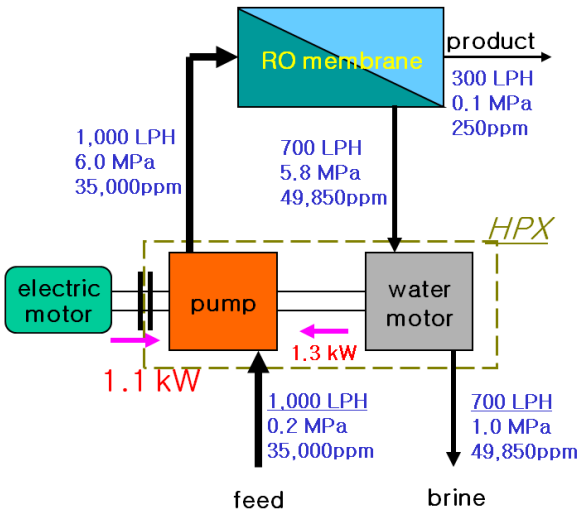

Fig. 2 Serial(direct) connection of the pump and the water motor in an ERD

회전형 용적식 ERD의 경우, APP(axial piston pump)와 APM(axial piston motor)의 피스톤으로 해수와 농축수가 분리되어 있으며, Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 직렬로 연결되어 동력을 전달(이하 직결형 ERD)한다.

고효율 에너지회수를 위해서는 이와 같이 에너지회수장치의 기본원리 및 구조상 발생하는 손실의 특성을 잘 이해하고 이를 극복할 수 있는 메커니즘의 개발이 필요하다.

3. 손실극복 메커니즘 설계

3.1 일체형 회전·용적형 ERD 설계

앞에서 살펴본 바와 같이, 다양한 에너지 회수장치의 구성이 가능하지만, 용적식 에너지회수장치가 유체기계방식의 에너지회수장치보다 효율이 높다. 이러한 용적식 에너지회수장치 중에서도 고압 동력의 전달이 가능하고 해수와 담수의 믹싱이 발생하지 않는 APP-APM 직결형 ERD가 유리하다고 할 수 있다.

이러한 직결형 ERD보다 향상된 에너지회수장치의 개발을 위하여 다음과 같은 손실 극복을 위한 메커니즘이 설계되었다.

수압펌프와 수압모터의 피스톤이 하나의 실린더 배럴을 공유하는 일체형 메커니즘을 Fig. 3과 같이 설계하였다. 이를 위하여 에너지회수장치의 밸브플레이트를 복렬포트로 설계하고, 펌프 및 모터용 입/출구를 포트커버에 형성하였다. 실린더배럴의 동일 피치원주상에 배치된 10개의 피스톤 중 5개는 펌프 피스톤으로, 나머지 5개는 모터 피스톤으로 구동되도록 하여, 병렬로 연결된 통합 구조로 구성하였다.

Table 1 Design parameters of the water hydraulic pump/motor

Design parameters	Pump	Motor
Volumetric displacement	12.5 *cc/rev*	7.677 *cc/rev*
Volume ratio of pump and motor	0.614	
Cross sectional area of one piston	193.5 mm^2	193.5 mm^2
Number of pistons	5	5
Tilt angle of swash plate	15°	10°
Stroke of piston	12.058 *mm*	7.935 *mm*
Pitch circle diameter of cylinder barrel	45 *mm*	45 *mm*

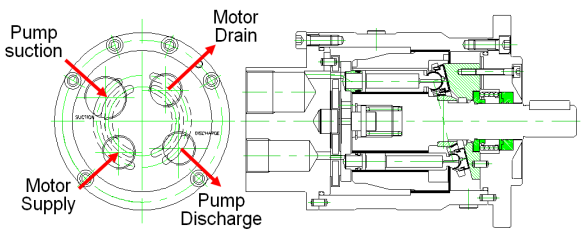

Fig. 3 Pump and motor pistons merged in a single cylinder block

3.2 로드형(Rod-type) 피스톤의 적용

기존 사판식 유압 피스톤 펌프 및 모터에서는 원통형(cylindrical) 피스톤이 주로 이용되는데, 피스톤 슈우가 운동할 때 측력(lateral force)에 의한 저항이 크게 작용한다. Fig. 4에서 사판의 경사각이 α, 슈우에 작용하는 반력이 F_R 일 때, 플런져형 피스톤에 작용하는 측력은 모멘트 평형에 따라 다음과 같다.

$$F_{L_1} = \frac{l_2}{l_1} F_R \sin\alpha$$

$$F_{L_2} = (1 + \frac{l_2}{l_1}) F_R \sin\alpha$$

피스톤 측면과 실린더 내면 사이의 고체마찰계수가 C_{df}일 때 마찰력은,

$$F_{f_1} = C_{df} \cdot F_{L_1}$$

$$F_{f_2} = C_{df} \cdot F_{L_2}$$

한편, Fig. 5에서 나타낸 바와 같이, 사판의 경사각 α, 로드의 틸팅각 ζ, 피스톤의 길이 l_p일 때, 로드형 피스톤에 작용하는 측력 F_L은,

$$F_L = F_R \cos(\alpha - \zeta) \sin\zeta$$

로드형 피스톤을 사용함으로써 피스톤과 로드사이의 구면 조인트에 의해 피스톤 측면에 작용하는 측력의 영향을 적게 받게 된다.[3] 공급압력이 60 kg_f/cm^2, 100 kg_f/cm^2 일 때 저항력을 두 피스톤 형식에 대해 측정한 결과, 플런져형 피스톤의 경우 로드형에 비해 각각 39%, 44% 더 큰 저항력이 작용함을 확인하였다. 이를 에너지회수장치의 설계에 적용하여 펌프용 및 모터용 피스톤을 설계하였다.

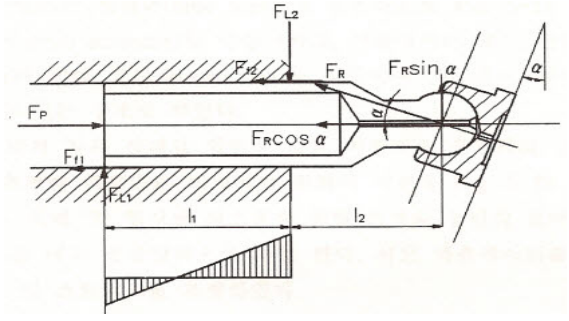

Fig. 4 Lateral force on the plunger-type piston[3]

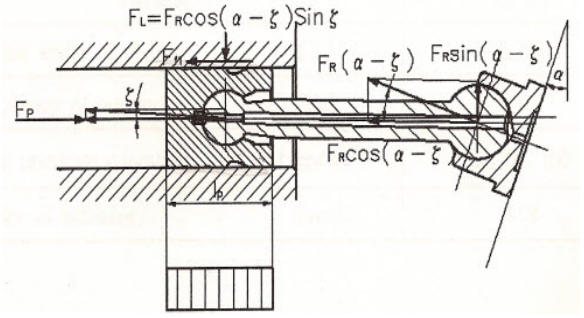

Fig. 5 Lateral force on the rod-type piston[3]

3.3 복합밸브의 사용

3.1에서 일체형 회전 · 용적식 ERD 구동을 위하여 복렬포트를 가지는 밸브 구조를 설계하였다. 이러한 구조에서 해수와 농축수가 하나의 밸브플레이트를 통과하며 공급 및 배출된다. 그런데, 해수와 농축수의 공급수와 배출수는 모두 다른 압력을 가지므로, 고압흐름의 포트와 저압흐름의 포트가 인접하여 배열되므로 얇은 벽 사이에 큰 압력차가 존재하므로 파손의 위험 등을 배제시키기 위해 펌프용 밸브포트는 판밸브로 구성되고 모터용 밸브포트는 원통형 밸브로 구성하여 분리하여 복합밸브 구조로 설계하였다.

Fig. 6 Double raw port design

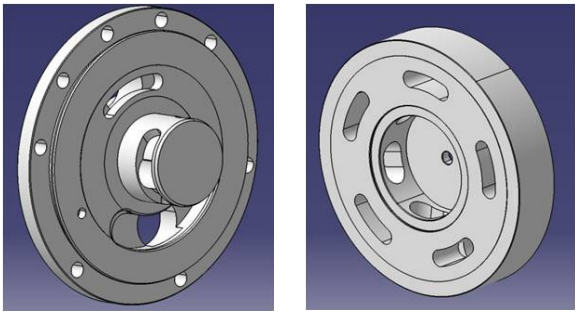

Fig. 7 Combined valve port design

4. 에너지회수장치의 구성 및 실험

4.1 APP-APM 직결형 ERD

APP와 APM을 직렬로 연결하여 회전·용적식 ERD로 구성하여 성능평가를 수행하였다.[4] APP가 APM에 연결된 경우와 APP만으로 구동되는 경우를 비교하여 소비전력을 측정한 결과 APM을 연결하여 ERD로 구성하여 고압에너지를 회수한 경우, Fig. 9에 나타난 바와 같이 소비전력이 39% 정도 적게 나타났다. 이 때, APP와 APM의 각각 효율이 82% 이상인 것을이용하였다.

4.2 복렬포트형 ERD

해수펌프용 피스톤과 농축수로 구동되는 해수압 모터용 피스톤이 하나의 실린더 배럴(cylinder barrel)의 동일 피치원주 상에 배치하여 PM2D(pump motor 2 delivery)형으로 구성하여 Fig. 10, 11과 같은 복렬포트와 로드형 피스톤을 적용한 에너지회수장치를 개발하였으며, 이를 검증하기 위해 유압더블펌프(AP2D모델, Bosh-Rexroth)를 개조하여 PM2D형으로 개조하여 그 성능을 확인하였다.[5] 펌프의 배제용적과 모터의 배제용적을 1:1로 하여 타당성 검증을 목표로 실험한 결과, 펌프구동 전기모터 구동을 위한 소비전력이 58% 정도 절감할 수 있음을 확인하였다.

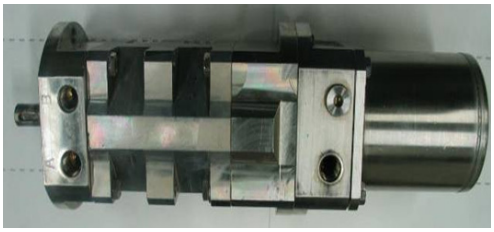

Fig. 8 APP-APM direct connected ERD

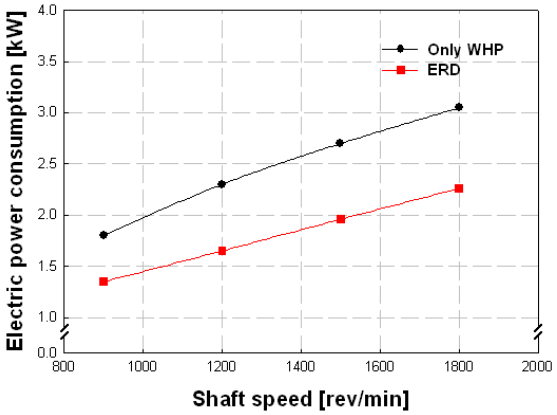

Fig. 9 Energy saving of direct connected ERD. A water hydraulic pump(WHP) is used as APP.

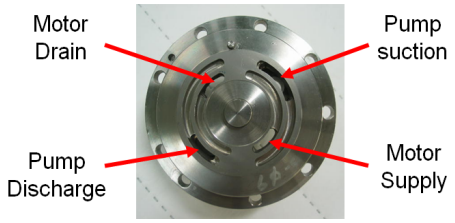

Fig. 10 Rear cover of the integrated-type ERD

Fig. 11 Pistons for the APP(left) and the APM(right)

4.3 복합밸브형 ERD

현재, 복렬포트로 구성된 밸브플레이트의 구조적 문제점을 개선하기위해 3.3의 복합밸브를 PM2D에 적용하여 회전·용적식 ERD를 구성하였다.

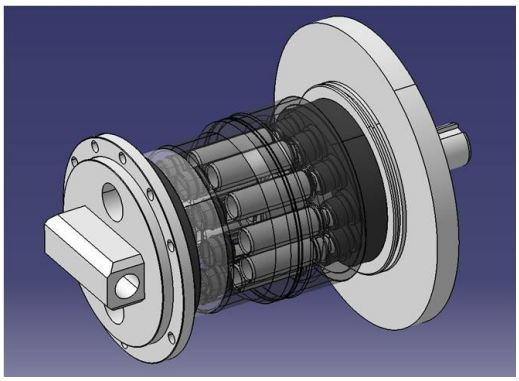

Fig. 12 Schematic of the KIMM-RERD model

4. 결 론

소용량의 담수화 시스템(분산형 담수화 시스템)에는 컴펙트하게 구성 가능한 회전·용적식 에너지 회수장치를 펌프와 모터를 직결하여 구성하는 것보다 일체형 회전·용적식 에너지 회수장치를 구성하는 것이 유리하다. 효율향상을 위해서도 두 개의 기기를 직결하는 형태 보다는 일체형 몸체에 펌프의 기능과 모터의 기능이 결합되어 있는 것이 효율적이라고 판단되어 지속적인 성능개선이 진행되고 있다.

후 기

본 연구는 국토해양부 플랜트기술고도화사업 “차세대 대용량 에너지 회수 메커니즘 개발” 과제의 일부이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Y. C. Kim, S. J. Park and Y. B. Ham, 2008, “Development Trend of Energy Recovery Device for the Reverse Osmosis System”, Journal of Machine and Materials, Korea Institute of Machinery and Materials, Vol. 20, No. 3 pp. 37-47.
2. R. L Stover, A. Ameglio, P. A. K. Khan, 2005, "The ghalilah SWRO plant on overview of the solutions adopted to minimize energy consumption," Desalination, 184, 217-221.
3. Y. B. Ham, 2003, "Analysis and characteristics evaluation of a hydraulic motor driven by rod pistons and tripod joints", Doctoral Thesis, KumOh National Institute of Technology.
4. Y. B. Ham, T. W. Kong, Y. C. Kim, S. J. Park, 2009, "Energy Saving Verification of Rotary type Energy Recovery Device for Sea Water Reverse Osmosis System", SeaHERO Academic Workshop on Development & Optimization of SWRO Desalination System.
5. Y. B. Ham et al., 2009, "Operating Experiment of a Rotory type Enegy Recovery Device", Autume Conference of Korea Society for Power System Engineering, pp.145-148.
6. Y. B. Ham, T. W. Kong, S. J. Park, Y. C. Kim, J. H. Park, S. N. Yun, K. Y. Kim, 2008, "Energy Recovery of Brine Pressure Using Hydrostatic Pressure Exchanger in RO Desalination System", International Conference on Cooling & Heating Technologies, pp. 645-650.
7. Y. B. Ham, J. H. Choi, S. J. Park, S. N. Yun, H. S. Jeong, 2008, "Power Recovery of Brine Pressure Using Hydrostatic Pressure Exchanger in Seawater Desalination System", 6th International Fluid Power Conference, pp. 353-365.
8. Y. B. Ham et al., 2007, "An analysis on power regeneration of hydrostatic pressure exchanger", Journal of the Korea Society of Fluid Power, Vol. 4, No. 3, pp. 7-12.