



중공사막 모듈을 이용한 정삼투 공정에서의 운영조건 변화에 따른 성능평가

Performance evaluation of forward osmosis (FO) hollow fiber module with various operating conditions

김봉철

Bongchul Kim

한국건설기술연구원 국토보전연구본부

Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

pp. 301-307

pp. 309-315

pp. 317-324

pp. 325-335

pp. 337-348

pp. 349-355

pp. 357-361

ABSTRACT

Forward osmosis (FO) process has been attracting attention for its potential applications such as industrial wastewater treatment, wastewater reclamation and seawater desalination. Particularly, in terms of fouling reversibility and operating energy consumption, the FO process is assumed to be preferable to the reverse osmosis (RO) process. Despite these advantages, there is a difficulty in the empirical step due to the lack of separation and recovery techniques of the draw solution. Therefore, rather than using FO alone, recent developments of the FO process have adapted a hybrid system without draw solution separation/recovery systems, such as the FO-RO osmotic dilution system. In this study, we investigated the performance of the hollow fiber FO module according to various operating conditions. The change of permeate flow rate according to the flow rates of the draw and feed solutions in the process operation is a factor that increases the permeate flow rate, one of the performance factors in the positive osmosis process. Our results reveal that flow rates of draw and feed solutions affect the membrane performance, such as the water flux and the reverse solute flux. Moreover, use of hydraulic pressure on the feed side was shown to yield slightly higher flux than the case without applied pressure. Thus, optimizing the operating conditions is important in the hollow fiber FO system.

Key words: Forward osmosis process, Hollow fiber membrane, Module performance evaluation, Operating condition, Osmotic dilution

주제어: 정삼투공정, 중공사막, 모듈성능평가, 운영조건, 삼투희석

1. 서 론

유도용액의 삼투압을 구동력으로 이용하는 정삼투(Forward osmosis, FO) 공정은 폐수처리, 하수재이용 및 해수담수화 분야에서 최근 각광받고 있다 (Cath et al., 2006). 특히, 물리적인 가압을 주요 구동력으로 하

는 역삼투(Reverse osmosis, RO) 공정에 비해 소비에너지 측면에서 우수하며 (Kim et al., 2016), 삼투압을 이용한 비가압 공정으로 인한 막오염 가역성이 뛰어나다는 장점을 통해 (Heo et al., 2016), 차세대 해수담수화 공정으로 각광받고 있다 (Kim et al., 2012; Lee et al., 2010).

정삼투 공정에 대한 최근의 관심으로 다양한 정삼투 관련 연구가 활발히 진행되고 있으며, 여러 연구

Received 12 July 2018, revised 30 July 2018, accepted 1 August 2018.

*Corresponding author: Bongchul Kim(E-mail: bongchulkim@kict.re.kr)

분야 중에서 정삼투막의 성능을 개선하는 개발에 대한 관심이 높은 추세이다 (Yip et al., 2010; Wang et al., 2010). 현재 정삼투막의 개발방향으로는 지지층 (Support layer) 내부에서 일어나는 농도분극현상 (Concentration polarization)을 최소화함과 동시에 활성층 (Active layer)의 선택도를 높여 염 제거율 및 투과수량을 향상시키려는 노력이 진행되고 있다 (Lee and Kim, 2016; Yip et al., 2010). 이러한 개발을 바탕으로 정삼투막은 현재 상용화 단계에 이르러 다양한 형태의 모듈이 개발되어지고 있다 (Ren and McCutcheon, 2018). 이 중 특히 막면적의 밀집도를 극대화시킨 중공사 형태의 모듈의 개발로 부지면적의 최소화를 기대하고 있다 (Wang et al., 2010).

정삼투 중공사 모듈에 대한 연구는 아직 초기단계로 막에 대한 기초적인 분석과 동시에 이를 포함한 정삼투 파일럿 스케일의 연구만이 제한적으로 진행되고 있다 (Wan et al., 2017; Kim and Park, 2011). 하지만 실제 공정에 적용하기 위해서는 다양한 조건에서의 파일럿 스케일의 성능평가가 필수적으로 필요하다. 따라서 본 연구에서는 중공사 모듈을 이용한 파일럿 스케일의 장치를 이용하여, 정삼투 공정에 운영조건에 따른 성능 변화를 평가하였다. 모듈 내 두가지 유체의 흐름인 원수와 유도용액의 유속에 따른 농도분극현상의 결과로 변하는 수투과량과 염의 역확산 정도를 평가하였으며, 이 때 발생하는 관 내외부의 압력에 따른 모듈의 성능을 평가하여 최적화된 중공사 모듈의 운영조건을 도출하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 중공사 정삼투 막 및 모듈

본 실험에서는 TOYOBO Co., Ltd.의 상용화 된 중공사 정삼투막 HPC3205 모듈이 사용되었다. 막의 소재는

Table 1. Specification of hollow fiber module

Parameters	Value
Membrane Material	Cellulose triacetate (CTA)
Membrane type	Hollow-fiber(Out-In)
Outside diameter of hollow fiber	245 μm
Inside diameter of hollow fiber	135 μm
Membrane Surface Area	20 m^2

셀룰로오스 계통(Cellulose triacetate, CTA)의 고분자 물질로 제작되었으며, 활성층과 지지층의 비대칭성 구조를 가지고 있다. 연구에 사용된 정삼투막에 관한 특성은 아래 Table 1에 정리하였다.

2.2 파일럿 스케일 정삼투 시스템

중공사 정삼투 모듈은 원수와 유도용액의 독립된 두 대칭 흐름이 가능하며, 두 개의 유체는 동일한 방향(co-current)으로 모듈 내로 진행될 수 있게 구성하였다. 기어펌프를 사용하여 원수와 유도용액의 흐름 속도를 일정하게 유지하였다. 원수와 유도용액 투과 유속은 유도용액의 무게 증가를 저울로 1분마다 측정하여 공정 내 시스템에 자동 기록되도록 설정하였으며, 유도용액에서 원수로 흐르는 염의 역확산은 원수의 전기전도도(ProfLine Multi 3320, WTW)를 측정하여 진행하였다. 정삼투 장치의 구성 모식도를 아래 Fig. 1과 같다.

유도용액으로는 NaCl 0.6 M 용액을 이용하여 해수의 농도만을 모사하였으며, 원수로는 수돗물을 선정하여 실험을 진행하였다. 유도용액과 원수의 유량을 다양하게 선정하여 운영조건에 따른 막의 성능을 투과유량과 염의 역확산을 통하여 확인하였다 (Table 2).

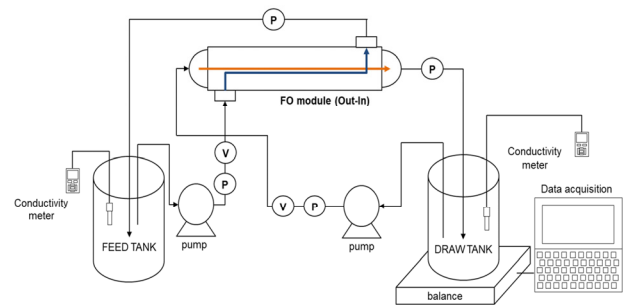


Fig. 1. Schematic illustration of pilot scale hollow fiber FO module test system.

Table 2. Operating conditions of pilot scale hollow fiber FO module test system

Operating conditions		Value
Feed solution	Flow rate	0.5, 1.0, 1.5 L/min
	Solution	Tap water
Draw solution	Flow rate	0.1, 0.15, 0.2 L/min
	Solution	0.6 M NaCl



3. 결과 및 고찰

3.1 유도용액 운영조건에 따른 모듈 성능변화

3.1.1 유도용액 유량에 따른 수투과량의 변화

유도용액 유량에 따른 수투과량의 변화를 원수 회수율이 70%에 도달할 때 까지 시간에 흐름의 기준으로 Fig. 2에 정리하였다. 여기서 확인할 수 있듯이 유도용액의 유속이 낮아질수록 투과유량 또한 낮아진다. 이는 막의 지지층 내부에 작용하는 농도분극현상 (Internal concentration polarization, ICP)이 유속의 증가에 따라 함께 증가하는 것으로 판단된다 (McCutcheon and Elimelech, 2006). 또한 Fig. 2에서 투과유량 증가에 따라서 원수의 회수율이 70%까지 도달한 시간이 차이나는 것을 확인할 수 있다. 이는 파일럿 스케일의 batch type 공정이 아닌 실규모 플랜트의 continuous flow type으로 변환시 필요 막면적과 비례한다고 할 수 있으므로 (Kim et al, 2017) 실규모 공정에서는 유도용액의 유량의 증가에 따라 필요 막면적이 감소하여, 막 구매 및 오염에 따른 교체비용 및 부지면적을 효과적으로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

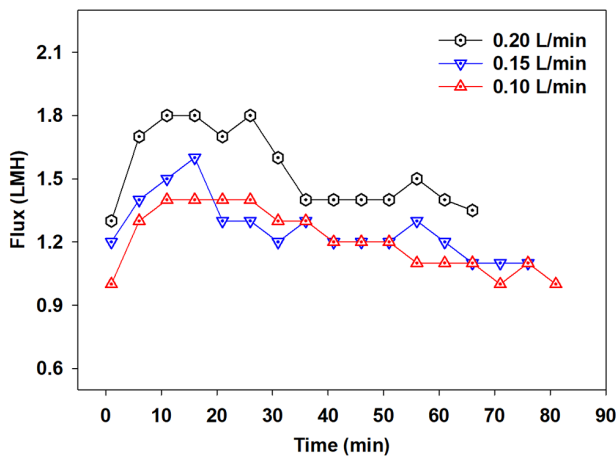


Fig. 2. Water fluxes of hollow fiber FO module according to time and various draw solution flow rate.

3.1.2 유도용액 유량에 따른 염 역확산의 변화

Fig. 3을 통하여 유도용액 유량에 따른 수투과량과 염의 역확산 정도를 나타내었다. Fig. 2에서 확인한 바와 마찬가지로 투과유량은 유도용액의 유량에 따라 증가하는 것으로 나타났으나, 염의 역확산 경향의 경우 투과유량과는 반대로 일정 유속 까지 증가하였을

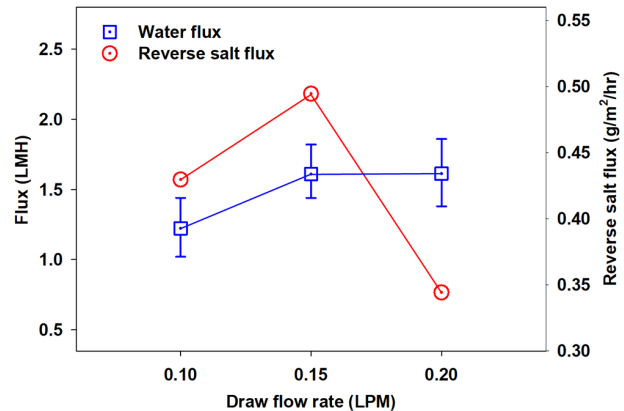


Fig. 3. Water and reverse solute fluxes according to various draw solution flow rate.

때는 내부농도분극의 저감에 따라 지지층에서 활성층에 도달하는 유효 유도용액의 농도 및 삼투압이 증가하여 투과유량 및 염의 역확산이 동일한 경향으로 증가한 것으로 판단된다. 하지만 유도용액의 유속을 일정 유속 이상으로 증가시켰을 때, 투과유량의 증가 및 모듈 내 유도용액 및 원수에 작용하는 모듈 내 압력의 작용으로 인하여 투과유량의 증가와 염역확산의 감소로 이어진 것으로 판단된다. 이는 선행연구에서 가압정삼투 공정과 같은 현상으로 판단되며 (Blandin et al., 2015; Oh et al., 2014), 관내 유량의 변화를 통하여 동일한 효과를 나타낼 수 있을 것으로 확인되었다.

3.2 원수 운영조건에 따른 모듈 성능변화

앞서 3.1 section에서 유도용액의 유량에 따른 모듈의 성능변화를 평가한 결과 유량의 변화를 통하여 가압정삼투의 효과를 도출하는 것을 확인하였다. 따라서

Table 3. Various operating conditions of feed solution

Flow rate (L/min)		Feed pressure (bar)		Draw pressure (bar)	
Feed	Draw	In	Out	In	Out
1.5	0.2	0.27	0.1	0.83	0
1	0.2	0.23	0.1	0.8	0
0.5	0.2	0.1	0.01	0.78	0
1	0.2	0.27 (P.A)	0.1	0.83	0
0.5	0.2	0.27 (P.A)	0.1	0.83	0

pp. 301-307

pp. 309-315

pp. 317-324

pp. 325-335

pp. 337-348

pp. 349-355

pp. 357-361

원수의 유량 변화시의 압력을 측정하고 유량 및 압력을 동일하게 하였을 때의 실험을 추가적으로 진행하여 유량과 압력이 모듈 성능에 미치는 영향을 각각 알아보았다. 이를 확인하기 위한 다양한 원수 운영조건은 Table 3에 정리하였다.

3.2.1 원수 유량 및 가압에 따른 수투과량의 변화

원수의 유입유량과 압력의 변화에 따른 초기 수투과량의 변화를 정리하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 확인되듯이, 0.27 bar로 동일한 압력(1.0 L/min (Pressure Applied, P.A), 0.5 L/min (P.A))이 가해진 운영조건에서는 원수의 유속 증가에 따라서 수투과량의 증가를 나타내었다. 이는 수투과량을 도출하는 수식에서 원수가 활성층 막표면에서 일어나는 외부농도분극 (External concentration polarization, ECP) 현상으로 인한 막표면에서 원수의 농축현상이 유량이 증가함에 따라 감소하기 때문으로 판단된다.

동일한 유속에서는 압력이 증가함에 따라 수투과량이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 table 3으로부터 확인할 수 있듯이, 본 실험에서 동일한 압력조건을 맞추기 위하여 추가로 가한 압력은 1.0 L/min, 0.5 L/min에 대해서 각각 0.05, 0.12 bar 정도로 아주 미세한 압력을 주어졌기 때문에 압력이 가해지지 않은 수투과량의 경향과 흡사하나 소폭 증가하는 현상이 나타난 것으로 판단된다.

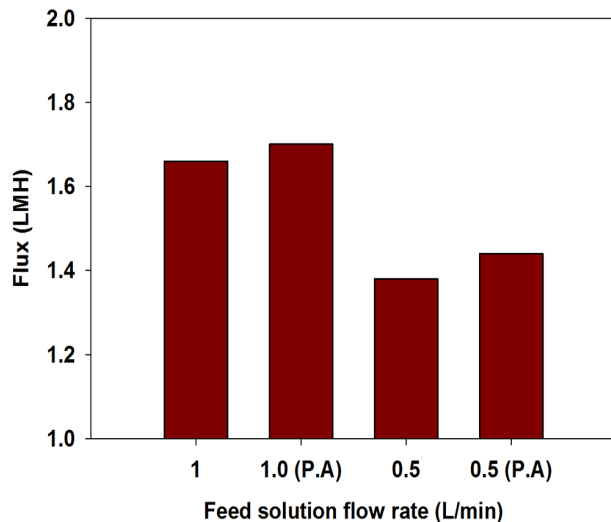


Fig. 4. Water fluxes of hollow fiber FO module according to various feed solution flow rate and pressure applied (P.A).

3.2.2 원수 유량 및 가압에 따른 염 역확산의 변화

초기 염역확산 결과를 정리하여 Fig. 5에 정리하였다. 원수 유입 조건이 동일한 압력 일 때, 확연히 유입 유량이 증가함에 따라서 염의 역확산이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 중공사 외부 막 표면에 증가하는 압력을 증가시킬 때 함께 증가하는 중공사 내부 막 표면의 압력이 더 크게 영향을 미쳐 중공사 내부로 흐르는 유도용질의 확산이 더 활발하게 진행된 것으로 판단된다.

동일한 유량 실험결과에서는 압력이 증가할수록 염의 역확산이 증가하는 것을 확인할 수 있는데 유량 변화에 따른 염의 역확산 차이보다 상당히 낮은 증감 폭을 나타내어 가해지는 압력보다 원수 유량에 따른 운영조건 설정이 모듈 성능에 더 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

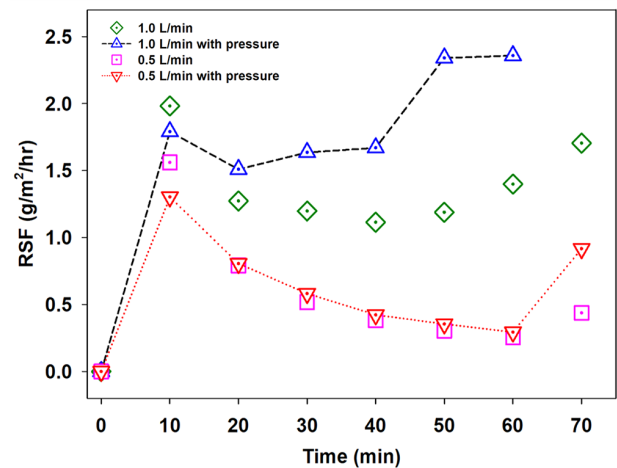


Fig. 5. Reverse solute fluxes of hollow fiber FO module according to time and various feed solution flow rate and pressure applied (P.A).

4. 결론

유도용액과 원수의 유입유량과 모듈 내 작용하는 압력의 운영조건에 따른 파일럿 스케일에서의 모듈 성능을 평가하였다. 도출된 결과를 바탕으로 정삼투막의 주요 성능지표인 수투과량과 염의 역확산 정도를 공정의 운영조건에 따른 인과관계를 확인하였으며, 주요 연구결과는 아래와 같다.

유도용액의 유량 증가에 따라 농도분극현상 저감으로 인해 수투과량과 염의 역확산이 증가하였으며, 일



정유량 이상 증가 시 모듈 내 압력 변화로 인한 수투과량의 증가 및 염의 역확산 감소 현상이 나타났다.

원수의 유량 및 압력에 따른 변화를 확인 결과 중공사 외부로 흐르는 원수의 유량이 내부로 흐르는 유도용액에 비해 높은 유량으로 운영되어 유량에 따른 압력변화가 작아 원수에 미치는 농도분극현상 또한 유량에 의해 쉽게 변화하였다.

본 실험 결과를 통해 파일럿 스케일에서 정삼투 운영 조건에 따라 중공사 모듈의 성능이 변화하는 것을 확인하였다. 기본적인 두 유체의 유입유량의 변화만으로도 정삼투막의 주요 성능지표인 수투과량과 염의 역확산이 유기적으로 변화하는 것을 확인할 수 있었으며, 유량변화에 따라 모듈 내부에 작용하는 압력 조건 또한 변화하는 것으로 나타났다. 이를 통하여 향후 정삼투 수처리 공정을 설계하는 데 있어서 최적화 된 운영 인자를 도출하여 공정의 효율 향상 및 비용 저감을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원 (과제번호 15IFIP-B088091-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- Blandin, G. Verliefde, A.R.D., and Clech P.L. (2015). Pressure enhanced fouling and adapted anti-fouling strategy in pressure assisted osmosis (PAO), *J. Memb. Sci.*, 493, 557-567.
- Cath, T.Y., Childress, A.E., and Elimelech, M. (2006). Forward Osmosis: Principles, Applications, and Recent Developments, *J. Memb. Sci.*, 281, 70-87.
- Heo, J., Han, J., Kim, Y., and Her, N. (2016). Systematic study on calcium-dissolved organic matter interaction in a forward osmosis membrane-filtration system, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 30(6), 737-744.
- Kim, B.C., Boo, C.H., Lee, S.Y., and Hong, S.K. (2012). Evaluation of Forward Osmosis (FO) Membrane Performances in a Non-Pressurized Membrane System, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 28(2), 292-299.
- Kim, B.C., Hong, S.K., and Choi, J.S. (2017). Pilot-Scale Simulation of Desalination Process Using Water Integrated Forward Osmosis System, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 33(4), 403-408.
- Kim, J., Han, J., Sohn, J., and Kim, S. (2016). The Outlook for Forward Osmosis-Reverse Osmosis (FO-RO) Hybrid Desalination Market, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 30(5), 521-532.
- Kim, Y.C. and Park, S.J. (2011). Experimental Study of a 4040 Spiral-Wound Forward-Osmosis Membrane Module, *Environ. Sci. Technol.*, 45, 7737-7745.
- Lee, J., and Kim, S. (2016). Evaluation of water permeability of forward osmosis membranes using osmotically driven membrane test, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 30(4), 417-425.
- Lee, S., Boo, C., Elimelech, M., and Hong, S. (2010). Comparison of Fouling Behavior in Forward Osmosis (FO) and Reverse Osmosis (RO), *J. Memb. Sci.*, 365, 34-39.
- McCutcheon, J.R., and Elimelech, M. (2006). Influence of Concentrative and Dilutive Internal Concentration Polarization on Flux Behavior in Forward Osmosis, *J. Memb. Sci.*, 284, 237-247.
- Oh, Y.T., Lee, S.H., Elimelech, M., Lee, S.H., and Hong, S.K. (2014). Effect of hydraulic pressure and membrane orientation on water flux and reverse solute flux in pressure assisted osmosis, *J. Memb. Sci.*, 465, 159-166.
- Ren, J., and McCutcheon, J.R. (2018). A new commercial biomimetic hollow fiber membrane for forward osmosis, *Desalination*, 442, 44-50.
- Wan, C.F., Yang, T., Lipscomb, G.G., Stookey, D.J., and Chung, T.S. (2017). Design and fabrication of hollow fiber membrane modules, *J. Memb. Sci.*, 538, 96-107.
- Wang, R., Shi, L., Tang, C.Y., Chou, S., Qiu, C., and Fane, A.G. (2010). Characterization of Novel Forward Osmosis Hollow Fiber Membranes, *J. Memb. Sci.*, 355, 158-167.
- Yip, N.Y., Tiraferri, A., Phillip, W.A., Schiffman, J.D., and Elimelech, M. (2010). High Performance Thin-Film Composite Forward Osmosis Membrane, *Environ. Sci. Technol.*, 44, 3812-3818.

pp. 301-307

pp. 309-315

pp. 317-324

pp. 325-335

pp. 337-348

pp. 349-355

pp. 357-361