

절삭유 수용액내 침지식 평막 모듈에 대한 사인파형 투과유속 연속운전 방식의 특성

원인혜 · 정건용[†]

서울과학기술대학교 화학생명공학과
01811 서울시 노원구 공릉로 232
(2014년 11월 14일 접수, 2014년 12월 3일 수정본 접수, 2014년 12월 11일 채택)

Characteristics of the Sinusoidal Flux Continuous Operation Mode for the Submerged Flat-sheet Membrane Module in Cutting Oil Solution

In Hye Won and Kun Yong Chung[†]

Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received 14 November 2014; Received in revised form 3 December 2014; accepted 11 December 2014)

요 약

본 연구에서는 emulsion 및 semi-synthetic 절삭유 수용액에 침지된 평막형 분리막의 막간 압력차(TMP)를 투과유속에 따라서 측정하였다. 사용한 정밀여과막은 유효 막면적이 0.02 m^2 이고 공칭 세공크기가 $0.15 \mu\text{m}$ 이었다. 저장조 내에 2 개의 분리막 모듈을 침지시키고 운전/휴직(R/S) 및 사인파형 투과유속 연속운전(SFCO) 실험을 동시에 실시하였다. Emulsion 수용액의 경우 SFCO에 의한 TMP는 R/S에 비하여 60% 이하로 유지되었으며 투과유속이 증가함에 따라서 TMP 감소효과는 줄어들었다. Semi-synthetic 수용액은 emulsion 수용액보다 탁도가 낮아 막오염이 적게 유발되었으며 장시간 운전할 경우 SFCO에 의한 TMP 효과도 감소하였다.

Abstract – In this study transmembrane pressure (TMP) was measured with respect to permeate flux through the submerged flat sheet membrane for the emulsion and semi-synthetic cutting oil solutions. The effective area and nominal pore size of the used microfiltration membrane were 0.02 m^2 and $0.15 \mu\text{m}$, respectively. The experiments were carried out simultaneously for run/stop (R/S) and sinusoidal flux continuous operation (SFCO) modes using two submerged membrane module in the reservoir. TMP for the case of SFCO was maintained under 60% of R/S, and the effect on TMP drop decreased as the permeate flux increased for emulsion cutting oil solution. Membrane fouling for the semi-synthetic solution showing low turbidity was induced lower comparing to the emulsion solution. Also, the effect on TMP drop for SFCO decreased during long-term operation.

Key words: Cutting Oil, Flat Membrane, Submerged Module, Sinusoidal Permeate Flux, TMP, Membrane Fouling

1. 서 론

석유산업 및 공업의 발달에 따른 정밀 금속가공에 사용되는 절삭유는 금속 가공유의 일종으로 절삭 가공 시 공구의 수명향상 및 정밀도, 가공속도의 상승을 위해 공구와 소재 사이에 공급된다. 절삭유 수용액은 금속간의 마찰을 줄이기 위한 윤활작용, 마찰로 인한 열팽창을 막기 위해 냉각 작용 그리고 부식 방지 등을 위하여 금속 가공 시 널리 사용되고 있다. 사용한 폐 절삭유를 처리하는 방법으로는 오일 폐액의 성상에 따라 부상유가 많을 경우 가압부상조(DAF)[1] 흡

착[2], 중력분리[3]와 같은 기계적인 분리 방법으로 제거한 후 생물학적 방법[4]으로 처리하여 방류한다[5]. 하지만, 수용성 오일은 안정한 상태로 수용액 중에 존재하기 때문에 먼저 화학응집[6]이나 전기영동 등의 방법으로 전처리 과정이 필요하며 경우에 따라서는 후속 처리 공정이 복잡하고 운전이 매우 까다로울 수 있다[7]. 하지만 환경적인 측면이나 자원적인 관점에서 볼 때 오일성분을 추출 및 제거하는 기술은 매우 중요하다[8].

분리막을 이용한 폐오일 처리 기술은 일찍이 1970년대부터 개발되어 왔으며 비교적 높은 오일의 제거가 가능하여 처리 수질이 우수하고 장치가 간단하며 자동화 운전 등으로 시스템이 차지하는 공간이 작을 뿐만 아니라 경제적으로도 매우 유용하여 지난 수 십 년간 그리고 향후에도 광범위하게 활용될 것으로 전망되고 있다[9,10]. 일반적으로 오일이 포함된 수처리 공정에서 사용하는 분리막은 정밀여과막(microfiltration)과 한외여과막(ultrafiltration)을 주로 사용하며 세

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kychung@seoultech.ac.kr

*이 논문은 한양대학교 배성열 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다. 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.

공크기가 더 작은 나노여과막(nanofiltration)은 특별한 경우를 제외하고 잘 사용하지 않는다. 일반적으로 한외여과막을 사용하면 오일 제거율은 높지만 투과유속이 낮고 이와 반대로 세공의 크기가 큰 정밀여과막을 사용하면 투과유속은 높을 수 있으나 제거율은 낮을 수 있다. 특히, 정밀여과막을 사용하면 투과 초기에 세공 중 특히 크기가 큰 부분으로 작은 오일 입자가 통과하지만 점차적으로 오일 입자가 세공의 표면이나 벽 내에 축적될 수도 있다. 이로 인해 세공 내부가 미세 오일입자로 포화되어 세공이 막히거나 그 크기가 감소되면 입자가 분리막 표면에서 서로 뭉치는 가교현상이 발생하여 입자의 겔층이 막표면에 형성되는 제2의 동적여과층(secondary dynamic layer)역할을 하게 되므로 비록 정밀여과막이지만 세공 크기보다 훨씬 작은 입자를 분리할 수도 있게 된다[11,12].

오일의 분리막 표면 축적 또는 겔층 형성, 세공 막힘 현상 등으로 인한 투과유속의 감소는 분리막 공정에서 불가피하게 발생하며 분리막 공정의 확대 응용을 위하여 반드시 극복하여야 할 문제이기도 하다[13]. 이에 공기를 분리막 표면에 공급하여 물리적인 세척으로 막 오염을 저감하거나 또는 낮은 투과유속으로 운전하여 막오염을 저감할 수 있다[14]. 나노 크기 중공사막의 재질에 따른 막오염에 대한 실험에서 접촉각이 낮을수록 높은 투과유속에서 오일을 완전히 제거하여 분리막 재질이 막오염에 영향을 미칠 수 있다[15,16]. 또한, 절삭유 용액의 점도 및 밀도와 같은 분리하려는 물질의 성분은 분리막 표면에서 막오염에 영향을 준다[17]. 따라서 이상과 같은 분리막 오염과 농도분극화 현상을 최소화하여 분리막의 수명을 연장시키고 또한 분리 효율을 향상시키기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 원수의 성분에 따라서 적절한 전처리 방식을 선택하고 이에 따른 적절한 분리막 및 모듈의 선정 그리고 물리적 또는 화학적 세척 방법을 포함한 최적의 운전조건을 모색하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 실험적 규모의 시스템에서 수용성 절삭유 수용액을 오일 성분보다 큰 세공분포를 지니는 침지식 정밀여과용 평막으로 투과시켜 투과유속을 높게 유지하면서 동시에 오일을 제거할 목적으로 수행하였다. 또한 기존 침지식 분리막의 운전/휴식(run/stop, R/S) 방식에 비하여 효과적인 시인파형 투과유속 연속운전(sinusoidal flux continuous operation, SFCO) 방법을 절삭유 수용액에 적용하고자 투과 실험하였다[18].

2. 실험 장치 및 실험 방법

2-1. 실험 장치

본 연구에서 사용한 분리막은 공칭공경 $0.15\ \mu\text{m}$ 인 P사 CPVC (Chlorinated Poly-Vinyl Chloride) 평막으로 양면의 유효 막면적이 $0.02\ \text{m}^2(0.1 \times 0.1\ \text{m})$ 이며 평막이 $0.006\ \text{m}$ 두께의 지지체에 고정되어 있는 모듈로서 처리수는 막모듈 상단 처리수 관으로 모아져서 배출되는 방식이며 실험장치에 대한 개략적인 흐름도를 Fig. 1에 나타내었다. 20 L 크기의 emulsion 또는 semi-synthetic type 절삭유 수용액 저장조(1)에는 평막형 분리막 모듈(2)이 침지되어 있고 교반기(3)를 설치하여 절삭유 수용액을 균일하게 혼합하도록 하였다. 분리막 모듈과 연결된 펌프((4), Masterflex 7518-00)를 사용하여 일정한 유량으로 투과액을 얻은 후, 투과액은 절삭유 수용액 농도를 일정하게 유지하도록 저장조로 반송하였다. 흡입압력은 압력계((5), Sensys PTDC-100 RCIA)로 측정하였고 UTP케이블로 연결된 컴퓨터(6)에 실시간으로 측정 압력을 저장하였다. 또한 기존의 생물막반응기 운

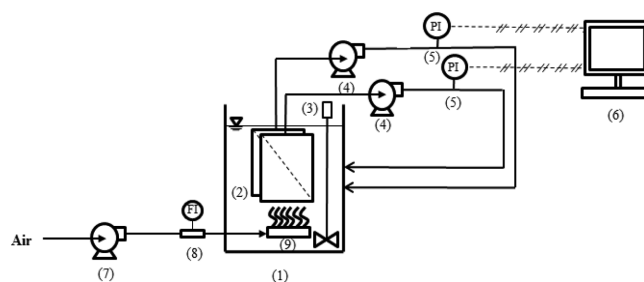


Fig. 1. Schematic flow diagram of the submerged membrane system.

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 1. Reservoir | 6. Computer |
| 2. Membrane | 7. Air pump |
| 3. Agitator | 8. Air flow meter |
| 4. Suction pump | 9. Air diffuser |
| 5. Pressure gauge | |

전방식과 같이, 에어펌프(7)를 사용하여 공급되는 공기는 유량계((8), Dwyer)로 측정된 후 저장조 하부에 설치된 산기관(9)을 통하여 저장조에 공급되었다. 이와 같이 공급된 공기는 저장조 내에서 상승하면서 분리막 표면에 축적되는 오일 입자를 세척하여 막 오염을 줄이는 작용을 할 수 있다.

2-2. 실험 방법

2-2-1. SFCO 및 R/S 운전방법

본 실험에서는 한 저장조 내에 표면적이 같은 동일한 분리막 2개를 침지시키고 동시에 SFCO 및 R/S 운전방식을 적용하여 투과시간에 따른 흡입압력 또는 막간 압력차(Tansmembrane Pressure, TMP)를 비교하였다. 투과 실험 후 분리막의 세척을 위하여 TMP가 55 kPa에 도달하면 R/S 및 SFCO 운전을 동시에 중지하였다. 또한 분리막 모듈 하단부에 위치한 산기관을 통하여 1 L/min의 공기를 연속적으로 공급하여 분리막의 오염을 저감시켰다.

SFCO 운전방식에 대한 펌프의 제어는 제어프로그램인 Labview에서 각 시간에 따른 유량을 가변시켜 펌프를 운전하였다. R/S 운전방식은 10분 흡입 및 2분 휴식을 통해 휴식시 산기에 대한 막 표면의 물리적 세정을 유도하였고 이를 기반으로 12분 주기로 운전할 경우 투과량과 투과유속을 Fig. 2에 각각 나타내었다. 투과유량이 10, 15, 20 $\text{L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 일 경우 매 12분 후에는 분리막을 투과한 투과량이 같아짐을 확인할 수 있다. 또한 SFCO 방식은 연속적으로 투과유속이 변화하지만 최대 투과유속이 R/S의 투과유속을 초과하지 않도록 조절하였으며 R/S 휴식 중에도 투과가 진행됨을 알 수 있다.

2-2-2. 정밀여과막의 전처리

본 실험에 사용된 분리막은 정밀여과막으로 일부 세공은 절삭유의 입자 크기보다 상대적으로 커서 절삭유의 제거율이 감소할 수 있다. 따라서 한외여과막보다 높은 투과유속을 지니면서 동시에 제거율 또한 향상시키기 위하여 분리막 표면에 인위적으로 얇은 오일층을 형성시켰다. 즉, 분리막을 절삭유 수용액에 침지 후 공기를 공급하지 않은 상태에서 펌프로 흡입하여 TMP가 20 kPa에 도달할 때까지 분리막의 표면을 오염시킨 후 순수 투과를 투과시켜 두 개의 분리막이 동일한 상태를 확인한 후 투과실험을 진행하였다.

2-2-3. 분리막 세정

투과 실험을 마친 후에는 분리막 표면을 부드러운 재질의 스펀지로

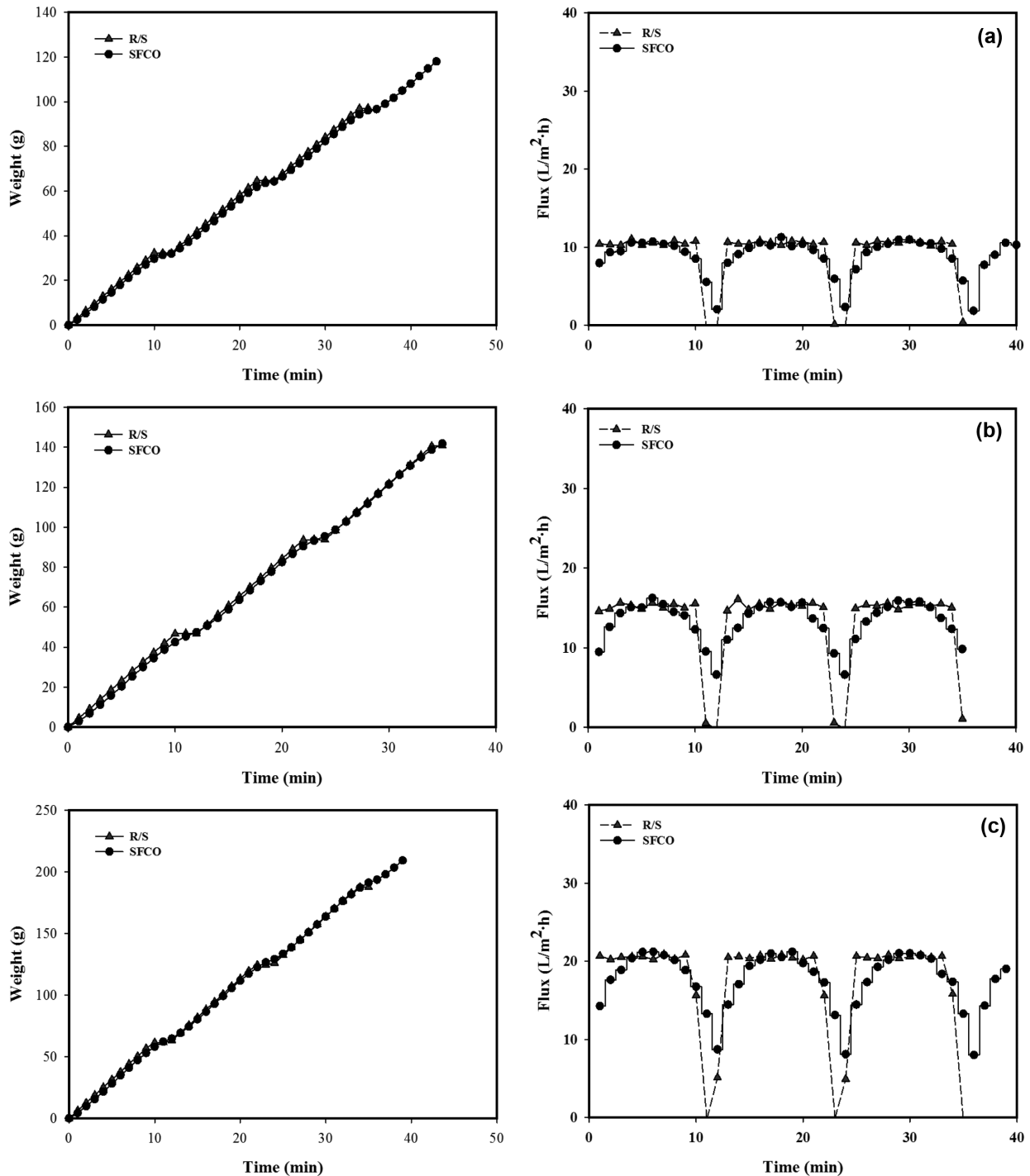


Fig. 2. Permeate weight and flux calibration for R/S and SFCO modes: (a) 10, (b) 15 and (c) 20 L/m²·hr.

물리적 세척하여 막 표면의 오일층을 제거한 후 순수에 침지시켜 동일 투과유속에서 TMP를 확인하였다. 또한 분리막을 0.1 wt% NaOH 수용액에 침지시켜 초음파세척기로 30분간 세척하였다. 그 후 에탄올 용액에 침지시키고 5분간 에탄올 용액을 투과시켜 분리막 표면 및 세공 내에 절삭유를 제거시킨 후 마지막으로 순수 투과유속을 측정하여 분리막의 세척을 확인하였다.

2-2-4. 절삭유 분석

본 실험에서 사용한 emulsion 및 semi-synthetic 절삭유(Korea Houghton

Co.) 수용액 농도에 따른 탁도를 탁도계(HACH, US2100N)로 측정하였으며 Fig. 3에 나타내었다. 이와 같은 검량선으로 투과액의 농도를 분석하여 분리막의 제거율을 나타내었다.

또한 emulsion 및 semi-synthetic 절삭유 수용액 내에 오일 입자분포를 입도분석기(Beckman Coulter LS 13 320)로 측정하여 Fig. 4에 나타내었으며 절삭유 오일입자는 0.04 내지 0.2 μm 범위에 폭넓게 분포함을 확인할 수 있었다. 절삭유를 제타전위측정기(Photal Otsuka ELSZ)로 측정한 결과 semi-synthetic 절삭유 수용액의 제타전위는 -43.5 mV, emulsion 절삭유 수용액의 제타전위는 -37.81 mV로 나타났다.

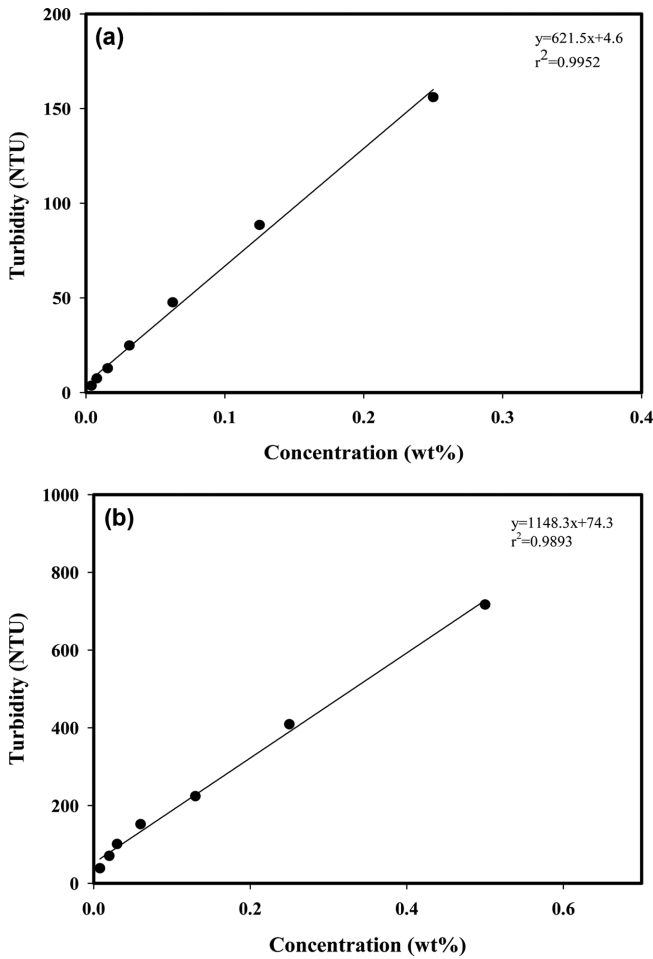


Fig. 3. Turbidity of the cutting oil solutions: (a) semi synthetic and (b) emulsion type.

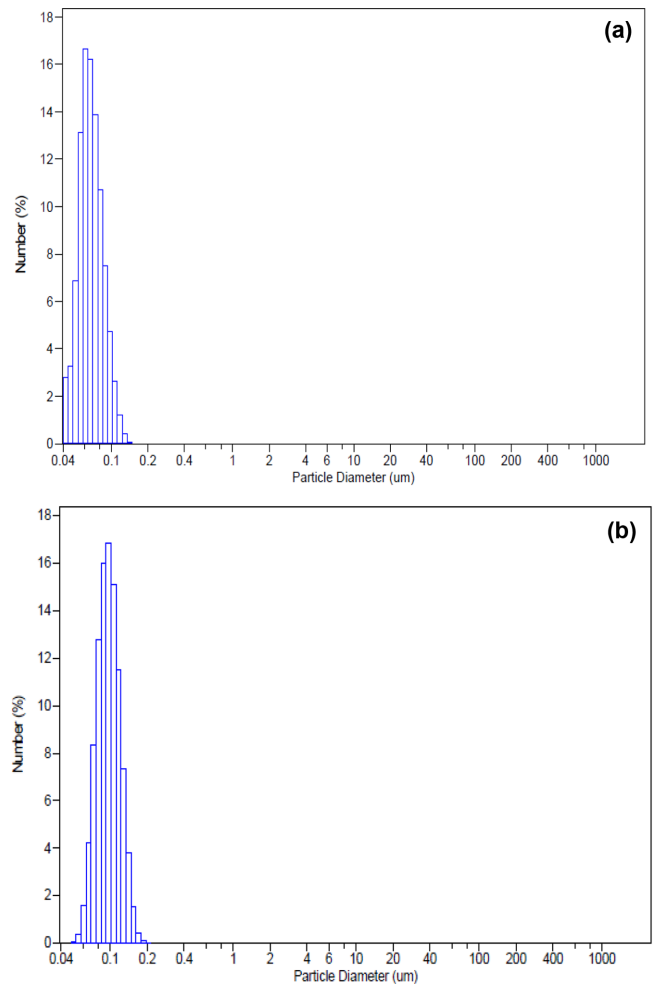


Fig. 4. Particle distribution of the cutting oil solutions: (a) semi synthetic and (b) emulsion type.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. Emulsion type 절삭유 투과실험

Emulsion type 절삭유 수용액 농도 1 wt%에 대한 R/S 및 SFCO 운전 방식의 TMP 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 투과유속이 낮은 10 L/m²·hr에서 R/S 운전방식은 10분간의 투과유속 운전시간동안 TMP가 지속적으로 상승하며 2분간의 휴식시간에는 TMP가 감소함을 알 수 있다. 그러나 20분 이후에는 TMP가 급격히 상승할 뿐만 아니라 휴식시간 중에도 상당히 높은 TMP를 유지하였다. 한편 SFCO 운전방식의 TMP는 시인파형 투과유속에 따라서 주기적으로 1.5 kPa 이하로 운전되었으며 80분 이후에도 R/S 방식에 비하여 매우 효과적으로 운전됨을 확인할 수 있었다. 투과유속을 15 L/m²·hr로 증가시키면 R/S 운전방식의 경우 첫 번째 10분 운전/2분 휴식 주기에서부터 TMP가 급격히 상승하였으며 2번째 운전/휴식 주기에는 40 kPa 이상에 도달됨을 확인하였다. 그 이후에는 각 운전주기마다 서서히 TMP가 증가하여 5번째 운전주기 중에는 최대 허용 TMP에 도달하여 운전을 중단하였다. SFCO 운전방식의 경우도 처음 12분 주기 동안에는 R/S 방식과 비슷하게 TMP가 증가하였지만 2번째 운전주기에 TMP가 최대대로 되었다가 그 다음에는 오히려 TMP가 감소하여 4 내지 5 운전 주기에서는 20 kPa 이하로 안정되게 운전됨을 확인하였다. 이와같은 현상은 절삭유 내지는 오일입자가 분리막에 오염될 경우 오일 입자

가 쉽게 변형이 가능하고 이에 따른 유체역학적 특성의 변화 등으로 분리막 투과과정에서 간혹 보고된 바 있다[6,19]. 투과유속을 20 L/m²·hr 까지 증가시키면 R/S 운전 방식에서는 첫 번째 운전주기에서 TMP가 40 kPa 이상에 도달하며 그 이후에는 서서히 증가하여 4 번째 주기만에 50 kPa 이상이 되었다. 하지만 이 경우에도 SFCO 운전방식은 첫 번째 주기에 최대 21 kPa 까지 상승하고 그 이후에는 29 kPa 정도로 일정하게 유지되어 R/S 운전 방식보다는 효과적임을 확인할 수 있었다. 또한 emulsion type 절삭유의 배제율은 10, 15 및 20 L/m²·hr 일 때 각각 94, 97, 99%로 투과유속이 증가함에 따라서 약간 증가하였다.

Emulsion type 절삭유 수용액 농도 0.5 wt%에 대한 R/S 및 SFCO 운전 방식의 TMP 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 투과유속이 낮은 10 L/m²·hr에서 R/S 운전방식은 처음 30분 이내에 TMP가 급격히 상승하였고 그 이후에는 TMP가 완만하게 상승하여 160분까지도 50 kPa 이하로 운전됨을 알 수 있다. SFCO 운전방식의 TMP는 시인파형 투과유속에 따라서 주기적으로 되면서 완만하게 증가하여 160분 이후에는 14 kPa까지 증가하였다. 하지만 R/S 운전방식과 TMP를 비교하면 1/3 수준으로 SFCO 운전방식이 효과적임을 알 수 있다. 투과유속을 15 L/m²·hr로 증가시키면 R/S 운전방식의 경우 두 번째 운전주기에서부터 TMP가 급격히 상승하였으며 4번째 운전/휴식 주기에는 40 kPa

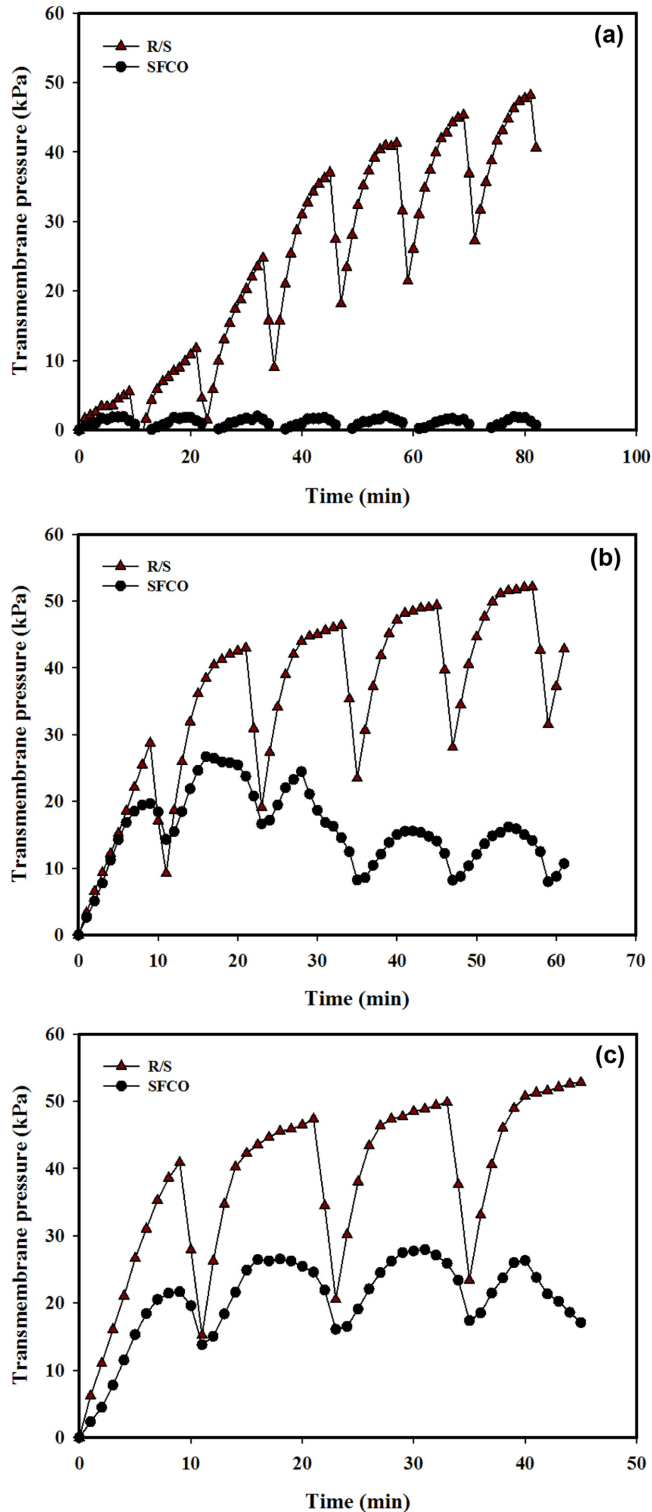


Fig. 5. Transmembrane pressure with respect to the operational time of R/S and SFCO modes for 1 wt% emulsion cutting oil solution at aeration rate 1 L/min and 25 °C: (a) 10, (b) 15 and (c) 20 L/m²·hr.

이상에 도달하였다. SFCO 운전방식의 경우 4번째 주기까지 R/S 방식과 비슷하게 TMP가 27 kPa까지 증가하였지만 6번째 운전주기에 오히려 TMP가 감소하여 15 kPa 이하로 안정되게 운전됨을 확인하였다. 마지막으로 투과유속을 20 L/m²·hr 까지 증가시키면 SFCO 운

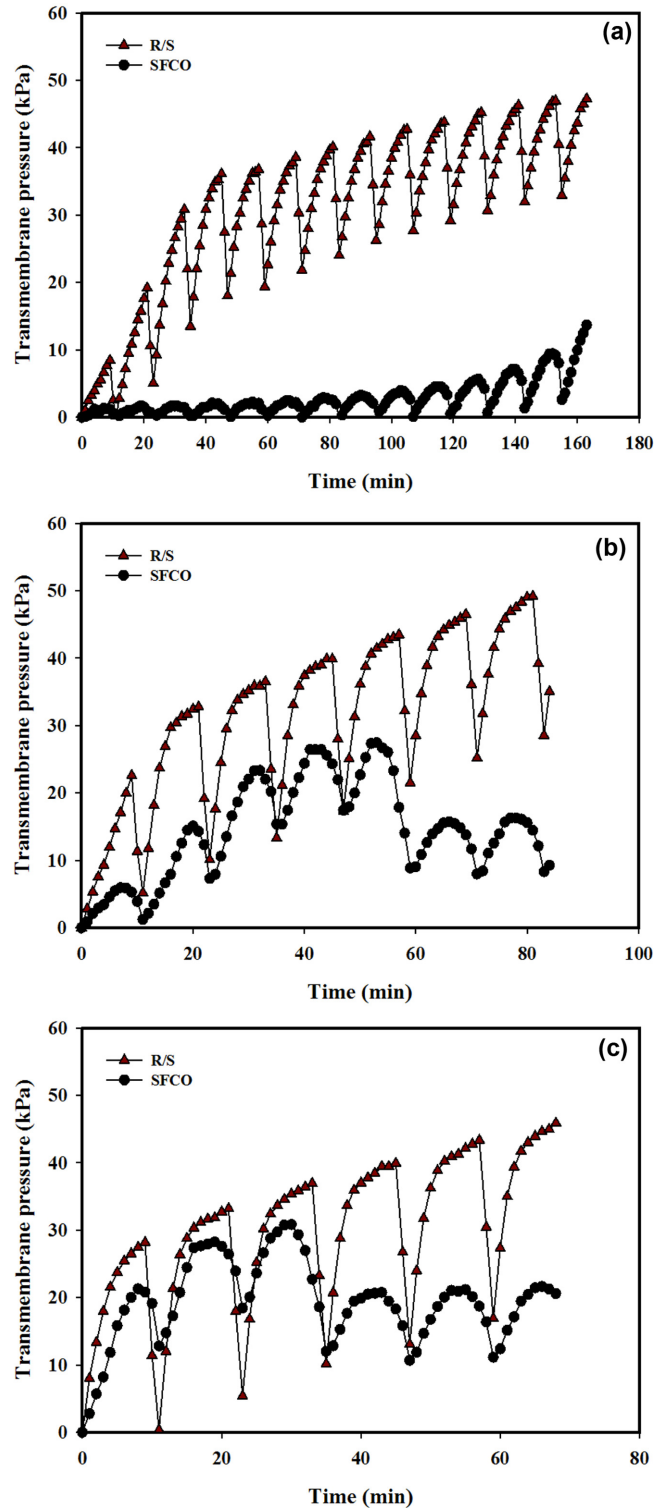


Fig. 6. Transmembrane pressure with respect to the operational time of R/S and SFCO modes for 0.5 wt% emulsion cutting oil solution at aeration rate 1 L/min and 25 °C: (a) 10, (b) 15 and (c) 20 L/m²·hr.

전방식의 TMP가 처음부터 상승하여 최대 31 kPa에 도달하여 R/S 운전방식과 유사하였지만 이후에는 20 kPa 정도로 감소하여 R/S 운전방식보다는 효과적임을 확인할 수 있었다. 또한 emulsion type 절삭유의 배제율은 투과유속에 관계없이 99% 이상이었다.

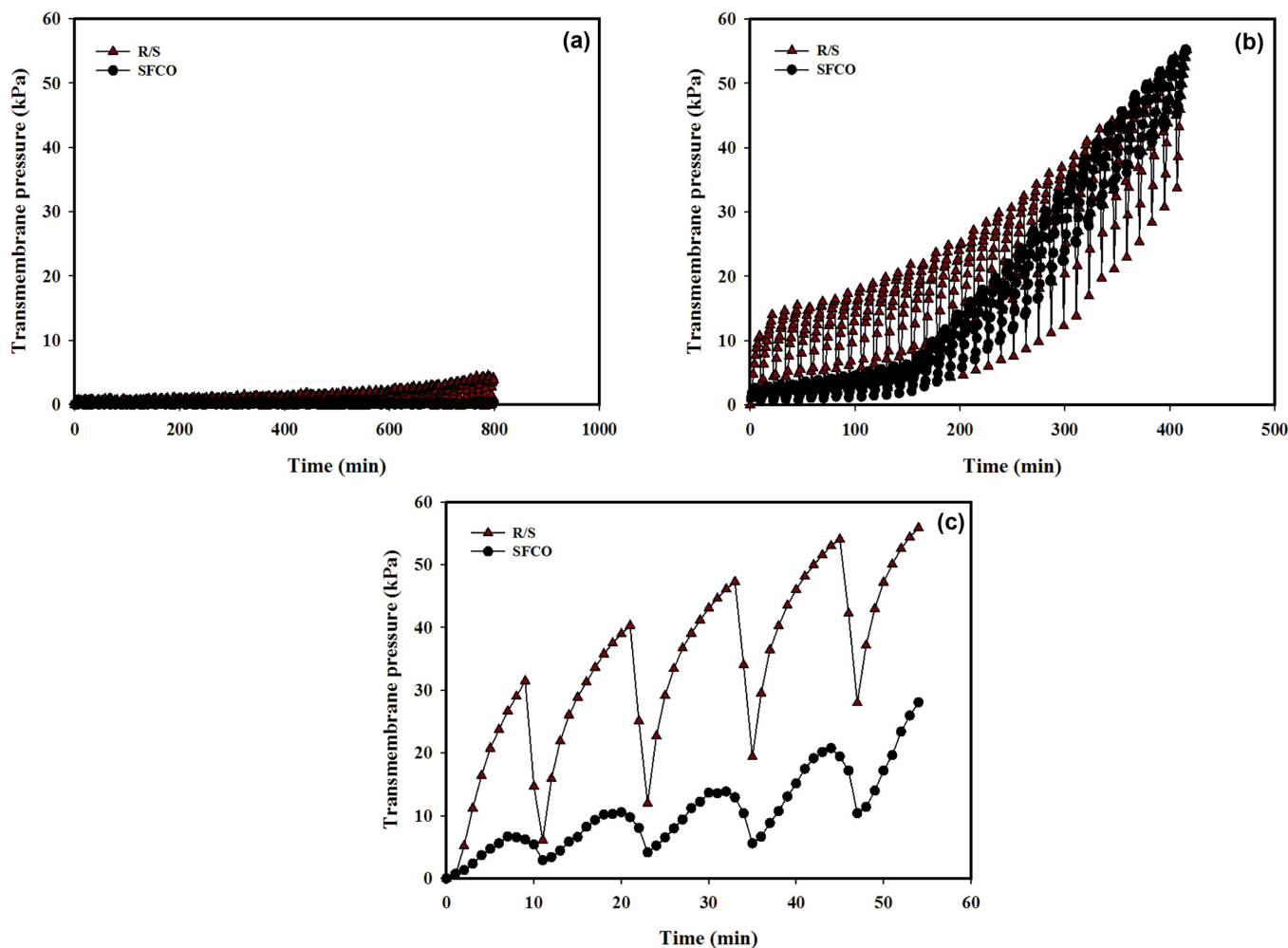


Fig. 7. Transmembrane pressure with respect to the operational time of R/S and SFCO modes for 0.5 wt% semi-synthetic cutting oil solution at aeration rate 1 L/min and 25 °C: (a) 10, (b) 15 and (c) 20 L/m²·hr.

3-2. Semi-synthetic type 절삭유 투과실험

Semi synthetic type 절삭유 수용액 농도 0.5 wt%에 대한 R/S 및 SFCO 운전 방식의 TMP 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 투과유속이 낮은 10 L/m²·hr에서는 분리막의 오염이 작아 R/S 운전방식은 600분까지 3 kPa정도로 운전되었으며 SFCO 운전방식 역시 주기적으로 1 kPa 이하로 운전되었다. 투과유속을 15 L/m²·hr 로 증가시키면 R/S 운전 방식의 경우 첫 번째 주기에서부터 TMP가 10 kPa 정도로 상승하였

으며 이후 TMP가 서서히 증가하였다. SFCO 운전방식의 경우 운전 시간 150분까지 6 kPa 정도로 낮게 운전되었으나 이후에는 TMP가 급격하게 상승하여 300분부터는 R/S 방식과 비슷하게 TMP가 상승하였다. 투과유속을 20 L/m²·hr까지 더욱 증가시키면 R/S 운전 방식에서는 첫 번째 운전주기에서 TMP가 30 kPa 이상에 도달하며 4번째 주기만에 50 kPa이상 도달하였다. 이에 비하여 SFCO 운전방식은 3 번째 주기까지 14 kPa 이하로 운전되었으며 4번째 주기부터 TMP가

Table 1. Transmembrane pressure comparison for R/S and SFCO modes at 45±1 kPa of R/S

Cutting oil type	Concentration [wt%]	Flux [L/m ² ·hr]	Time [min]	Transmembrane pressure [kPa]		Transmembrane pressure Improvement* (%)
				R/S [P1]	SFCO [P2]	
Emulsion	1	10	69	45.3	1.5	97
		15	30	45.0	18.7	58
		20	18	45.5	26.5	42
	0.5	10	129	45.2	5.0	89
		15	67	45.4	15.4	66
		20	67	45.0	21.2	53
Semi-synthetic	0.5	10	799	3.8	0.4	89
		15	117	23.6	6.9	71
		356		45.5	42.9	6
		20	32	44.6	13.8	69

* (P1-P2)/P1×100

증가하였지만 R/S 운전 방식보다는 매우 효과적임을 확인할 수 있었다. 또한 semi-synthetic type 절삭유류의 배제율은 투과유속에 관계 없이 96% 이상이었다.

4. 결 론

침지식 정밀여과용 분리막 모듈로 절삭유류 처리할 경우 절삭유는 94% 이상 제거가 가능하며 연속적으로 운전이 가능함을 확인하였다. 또한 SFCO 방식으로 운전할 경우의 막오염 저감으로 인한 TMP 효과를 평가하기 위하여 R/S 운전방식의 TMP가 45 kPa에 도달하였을 때 SFCO 방식의 TMP를 확인하였으며 이에 대한 실험결과를 요약하여 Table 1에 나타내었다. 전반적으로 사인파형 투과유속으로 연속 운전하는 SFCO 방식이 효과적임을 확인하였다. 특히 원수의 탁도가 높아 분리막 오염이 크게 발생하는 emulsion type 절삭유 수용액에 적용할 경우 보다 더 효과적이었다. 또한 투과유속이 증가할수록 SFCO 방식의 TMP 감소 효과가 줄어드는 것으로 나타났다. 계속하여 장시간 운전하였을 경우에 SFCO 운전방식의 막오염 저감등 운전비를 고려한 경제성 평가하기 위하여 추가적인 연구가 수행되고 있다.

감 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제입니다(과제번호: E614-00112-0402-1).

References

- Bensadok, K., Belkacem, M. and Nezzal, G., “Treatment of Cutting Oil/water Emulsion by coupling Coagulation and Dissolved Air Flotation,” *Desalination*, **206**, 440-448(2007).
- Ayotamuno, M. J., Kogbara, R. B., Ogaji, S. O. T. and Probert, S. D., “Petroleum contaminated Ground-water: Remediation Using Activated Carbon,” *Appl. Energy*, **83**, 1258-1264(2006).
- Al-Shamrani, A. A., James, A. and Xiao, H., “Separation of Oil from Water by Dissolved Air Flotation,” *Colloid Surf. A*, **209**, 15-26 (2002).
- Zhao, X., Wang, Y., Ye, Z., Borthwick, A. G. and Ni, J., “Oil field Wastewater Treatment in Biological Aerated Filter by Immobilized Microorganisms,” *Process Biochem.*, **41**, 1475-1483(2006).
- Cheryan, M., “Ultrafiltration and Microfiltration Handbook,” CRC Press LLC, Florida(1998).
- Khemis, M., Tanguy, G., Leclerc, J. P., Valentin, G. and Lapicque, F., “Electrocoagulation for the Treatment of Oil Suspensions: Relation Between the Rates of Electrode Reactions and the Efficiency of Waste Removal,” *Process Saf. Environ. Protect.*, **83**, 50-57(2005).
- Chung, K. Y., Kim, J. J., Kim, K. J. and Fane, A. G., “Microfiltration Characteristics for Emulsified Oil in Water,” *Membrane J.*, **8**(4), 203-209(1998).
- Yoon, S. M., Park, K., Kim, J. Y., Han, H. J., Kim, T. I., Kang, K. S., Bae, W. and Rhee, Y. W., “Technology Trend of Oil Treatment for Produced Water by the Patent Analysis,” *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**, 681-687(2011).
- Schoeman, J. J. and Novhe, O., “Evaluation of Microfiltration for the Treatment of spent Cutting-Oil,” *Water SA*, **33**(2), 245-248 (2009).
- Salahi, A., Gheshlaghi, A., Mohammadi, T. and Madaeni, S. S., “Experimental Performance Evaluation of Polymeric Membranes for Treatment of an Industrial Oily Wastewater,” *Desalination*, **262**(1), 235-242(2010).
- Visvanathan, C. and Aim, R. B., “Application of an Electricfield for the Reduction of Particle and Colloidal Membrane Fouling on Crossflow Microfiltration,” *Sep. Sci. Technology*, **24**(5/6), 383(1989).
- Patel, T. M. and Nath, K., “Modeling of Permeate Flux and Mass Transfer Resistances in the Reclamation of Molasses Wastewater by a novel Gas-sparged Naofiltration,” *Korean J. Chem. Eng.*, **31**(10), 1865-1876(2014).
- Milić, J. K., Murić, A., Petrinić, I. and Simonić, M., “Recent Developments in Membrane Treatment of spent Cutting-Oils: A Review,” *I&EC Research*, **52**, 7603-7616(2013).
- Li, X., Li, J., Wang, J., Wang, H., Cui, C., He, B. and Zhang, H., “Direct Monitoring of Sub-critical Flux Fouling in a Horizontal Double-end Submerged Hollow Fiber Membrane Module Using Ultrasonic Time Domain Reflectometry,” *J. Membr. Sci.*, **451**, 226-233(2014).
- Obaid, M., Baraket, N. A. M., Fadali, O. A., Motlak, M., Almajid A. A. and Khalil, K. A., “Effective and Reusable Oil/water Separation Membranes Based on Modified Polysulfone Electrospun Nanofiber Mats,” *Chem. Eng. J.*, **259**, 449-456(2015).
- Zhu, X., Tu, W., Wee, K. H. and Bai, R., “Effective and Low Fouling Oil/water Separation by a Novel Hollow Fiber Membrane with Both Hydrophilic and Oleophobic Surface Properties,” *J. Membr. Sci.*, **466**, 36-44(2014).
- Belkacem, M., Hadjiev, D. and Aurelle, Y., “A Model for Calculating the Steady State Flux of Organic Ultrafiltration Membranes for the Case of Cutting Oil Emulsion,” *Chem. Eng. J.*, **56**, 27-32 (1995).
- Chung, K. Y., Kim, D. C. and Won, I. H., “Method for Reducing Membrane Fouling in the Water Treatment Apparatus,” Korea Patent, 10-2014-0149394 (2014).
- Zeman, L. J. and Zydney, A. L., “Microfiltration and Ultrafiltration Principles and Applications,” Marcel Dekker Inc., New York (1996).