

A process diagnosis method for membrane water treatment plant using a constant flux membrane fouling model

정유량 막여과 파울링 모델을 이용한 막여과 정수 플랜트 공정 진단 기법

Suhan Kim*

김수한*

부경대학교 토목공학과

Abstract : A process diagnosis method for membrane water treatment plant was developed using a constant flux membrane fouling model. This diagnosis method can be applied to a real-field membrane-based water treatment plant as an early alarming system for membrane fouling. The constant flux membrane fouling model was based on the simplest equation form to describe change in trans-membrane pressure (TMP) during the filtration cycle from a literature. The model was verified using a pilot-scale microfiltration (MF) plant with two commercial MF membrane modules (72 m² of membrane area). The predicted TMP data were produced using the model, where the modeling parameters were obtained by the least square method using the early plant data and modeling equations. The diagnosis was carried out by comparing the predicted TMP data (as baseline) and real plant data. As a result of the case study, the diagnosis method worked pretty well to predict the early points where fouling started to occur.

Key words : membrane water treatment plant, process diagnosis, constant flux, membrane fouling model

주제어 : 막여과 정수 플랜트, 공정 진단, 정유량(플럭스), 막여과 파울링 모델

1. 서론

2009년 가동을 시작한 공주정수장을 필두로, 국내에 막여과 정수 플랜트가 지속적으로 도입되기 시작하였다. 기존 정수장의 노후화, 상수원수 수질 악화, 먹는물 수질 기준 강화, 막여과 기술의 우수성 등으로 인해 앞으로 이런 추세는 더욱 증가할 것으로 기대된다(Kim *et al.*, 2007).

막여과 공정 도입 시 장벽은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫째, 모래여과로 대변되는 기존 재래식

정수처리 공정 대비 높은 건설비와 운영비, 둘째, 파울링으로 인한 운영의 어려움이다. 첫 번째 장벽은 막여과 공정에 대한 수요 증가에 편승하는 공급 확대로 어느 정도 해소가 되어 가고 있으나, 두 번째 문제인 파울링은 막여과 공정이 존재하는 한 영원히 따라올 문제가 될 것으로 판단된다.

연구실 규모에서의 파울링에 대한 연구는 무수히 많고, 매우 높은 수준으로 발전되어 있다. 그러나, 파일럿 규모 이상의 현장에서 행해진 연구는 여건 상 상대적으로 적은 편이다. 국내에서는 한 국수자원공사 등에서 막여과 정수 플랜트 현장에서 발생하는 연구를 다양하게 수행하고 있다(Kim *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2008; Hwang *et al.*,

* Received 13 January 2013, revised 12 February 2013, accepted 14 February 2013.

* Corresponding author: Tel: 051-629-6065, Fax: 051-629-6063, E-mail: suhankim@pknu.ac.kr

2009; Kim *et al.*, 2010).

현장에서 막여과 정수플랜트를 운영하는 입장에서 가장 필요한 것은 돌발적인 문제 상황(원수 수질 이상, 장치 고장 등)을 최대한 빨리 진단하여 이를 해결하는 것이다. 현재 국내 기술로는 현장에서의 막여과 공정 진단은 사후 판단에 그치고 있어, 돌발적인 문제의 실시간 진단 및 해결은 거의 불가능하다. 한계 차압에 도달하는 기간을 비교하여 막 수명이 노화되고 있다는 사실을 알아낸다거나, 화학세정(CIP; Clean in Place) 효율이 예전 대비 낮아졌다는 사실로부터 막 공극 내부의 비가역적 파울링의 증가를 알아내는 것이 이러한 사후 판단의 사례가 될 수 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해, 기존의 사후 판단 형 막여과 공정 진단이 아닌, 실시간 문제 상황 판별이 가능한 막여과 공정 진단 기법을 개발하였다. 구체적으로 언급하자면, 문헌 연구를 통해 정유량 파울링 모델을 구축하고, 이를 현장 데이터와 연계하여 이상적인 막여과 운전 데이터를 모사할 수 있는 시뮬레이션 기법을 도출하여, 막여과 공정 진단에 적용, 검증하였다.

2. 연구방법

2.1 정유량 막여과 파울링 모델

정수장에 도입되는 막여과 공정은 수요자에게 약속된 수량을 공급하는 데 유리한 정유량 제어를 따르고, 에너지 비용 효율화를 위해 전량여과 (dead-end filtration)를 채택하므로 여과와 역세가 주기적으로 반복된다. 따라서, 현장 적용을 위한 정유량 막여과 파울링 모델은 이러한 여과와 역세를 모두 모사할 수 있어야 한다.

여과 시 막간차압(TMP; Trans-membrane pressure; Δp ; Pa)과 플럭스(J ; m/s)의 관계는 식 1과 같다.

$$J = \frac{\Delta p}{\mu R} \quad (1)$$

식 1에서 μ 는 물의 점성계수(Pa·s), R 은 막 저항(자체 저항과 오염 저항의 합; m^{-1})을 나타낸다. 여과가 지속되면, 막을 통과하지 못한 이물질에 의해 막오염이 발생하고 이로 인해 막 저항이 상승하게 된다. 정유량 제어 시에는 플럭스가 일정하게 유지하기 위하여 막간차압이 막 저항값과 같은 비율로 상승하게 된다. 여과 지속 시간에 따른 막간 차압의 상승에 대한 수식은 다양한 연구를 통해 연구되어 왔다(Grace, 1956; Ho and Zydney, 2002; Sun *et al.*, 2008; Chellam and Cogan, 2011; Sioutopoulos and Karabelas, 2012).

본 연구에서는 문헌조사를 통해서 식 2와 같은 가장 단순한 형태의 막간 차압 상승식을 적용하였는데, 그 이유는 복잡한 현장 데이터와 결합하여 해석하기에 유리하기 때문이다.

$$\frac{d(\Delta p_i)}{dt} = k(\Delta p_i)^n \quad (2)$$

식 2에서 Δp_i 는 i 번째 여과 사이클에서의 막간차압(Pa), t 는 여과지속시간(s), k 는 비례상수(Pa $^{1-n}$ /s), n 은 막오염 특성 인자(Fig. 1 참조)를 각각 나타낸다(Park *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2012).

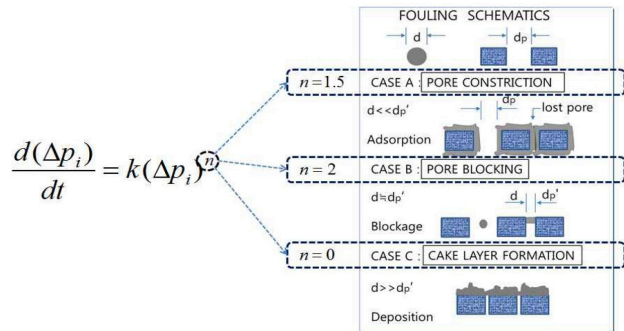


Fig. 1. Three fouling mechanisms for the fouling model

식 2에 따르면, 막간차압 상승 속도는 막간차압이 높을수록 증가한다. 또한, 막간차압 상승 속도는 플럭스가 높을수록 증가한다. 따라서, 비례상수 k 는 식 3과 같이 플럭스에 비례한다고 가정하였다.

$$k \propto J \quad (3)$$

모델의 주요 인자들인 k 와 n 은 식 2의 미분 방정식과 플랜트 운전 데이터를 연계한 최소 자승법을 통해 구할 수 있다. 이와 같이 막여과 정수 플랜트에서 여과 공정은 식 1 ~ 3을 이용하여 묘사할 수 있다.

역세의 경우는 역세를 통해 막오염이 일부 제거되는 것으로 가정하여 식 4와 같이 역세척 후의 막 저항값을 결정하였다.

$$R_{i+1,0} = R_{i,0} + (R_{i,f} - R_{i,0}) * RIF \quad (4a)$$

$$RIF \propto (R_{i,f} - R_{i,0}) / R_{i,0} \quad (4b)$$

식 4에서 $R_{i+1,0}$ 과 $R_{i,0}$ 은 $i+1$ 번째 여과 사이클과 i 번째 여과 사이클의 초기 막저항을 나타내고, $R_{i,f}$ 는 i 번째 여과 사이클의 마지막 막저항(즉, 역세 직전의 막저항)을 나타내며, RIF 는 비가역적 막오염(역세에 의해서 제거되지 않는 막오염)의 비율을 나타낸다. 식 4a에서 RIF 가 0보다 크면 $i+1$ 번째 사이클의 초기 막저항이 i 번째 사이클의 초기 막저항보다 크므로, 역세척 후에 오염 물질이 막에 남아 있음을 의미한다. 또한, 오염이 많이 된 막일수록 역세척 효율이 나쁘다는 현상을 반영하기 위해, RIF 는 오염 비율(즉, 막오염 저항과 순수 막저항의 비; 식 4b 참조)에 비례하도록 가정하였다.

2.2 막여과 파일럿 플랜트

2.1절에서 도출된 정유량 막여과 파울링 모델의 세 가지 주요 인자(k , n , RIF)를 얻기 위해서는 실제 운전 데이터가 필요하다. 정유량 막여과 파울링 모델에 사용될 운전 데이터는 각 여과 사이클별 운전 시간(식 2의 t), 수온(물의 점성계수를 계산하는 데 사용됨; 식 1의 μ), 막간차압(식 2의 Δp_f)이다. 여기에서 막간차압은 온도의 영향을 보정한 보정 막간차압으로 사용되어야 하는데, 보정값을 구하는 방법은 식 5와 같다(Kim et al., 2010).

$$\text{보정차압} = \text{실제차압(측정차압)} \div \text{온도보정계수} \quad (5a)$$

$$\text{온도보정계수} = \frac{\mu_T}{\mu_{25}} \quad (5b)$$

$$\mu_T(\text{점성계수, mPa}\cdot\text{s}) = A \exp\left[\frac{B(T-C)}{D+T}\right] \quad (5c)$$

식 5에서, T 는 온도(K), A , B , C , D 는 점성계수 μ_T 를 구하기 위한 상수로 각각 $A: 0.1257187 \times 10^{-1}$, $B: -0.5806436 \times 10^{-2}$, $C: 0.1130911 \times 10^{-2}$, $D: -0.5723952 \times 10^{-6}$ 와 같다. 상수 A , B , C , D 는 온도에 따른 점성계수 데이터를 이용한 회귀분석을 통해서 구한다.

모델링 검증을 위해 사용되는 실제 운전 데이터는 한국수자원공사 K-water 연구원에서 운영

Table 1. Membrane type and operation method for the pilot system

Intake		Reservoir	Membrane type	MF
Operation		Pressurized	Module type/ Diameter(mm)	Hollow fiber/ 1.5 mm(outer), 0.9 mm (inner)
Filtration		Dead-end filtration		
control		Constant flux operation	Capacity (m ³ /d)	500
c y c l e	Supply → Filtration → Backwash → Drainage	Supply: 25 sec Filtration: 30 min (Flux 1 m ³ /m ² ·d) Backwash: 30 sec, (Filtrate with 10 mg/l of NaOCl + air scrubbing) Drainage: 30 sec	No. of modules	4 (2 per each unit)
			Pore size (μm)	0,05
	CIP ¹⁾ chemical	(COOH) ₂ , NaOCl	Membrane area (m ²)	72
			Membrane material	PVDF

1) CIP: Clean in Place

한 파일럿 플랜트 데이터를 활용하였다(Kim *et al.*, 2007; K-water, 2008). 파일럿 플랜트에 적용된 막모듈은 공경 0.05 μm 의 외압식의 가압식(케이싱형) PVDF 정밀여과 막모듈이었고, 2005년부터 2008년까지 두 개 계열로 운전이 되었다. 한 계열은 플렉스를 변동하여 운전하였고, 나머지 한 계열은 플렉스를 $1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 로 고정하여 운전하였다(K-water, 2008). 본 연구에 사용된 데이터는 플렉스를 고정하여 운전한 계열에 대한 것으로, 2005년부터 2007년까지 3년간 막모듈 교체가 없이 운전된 시기의 데이터이다. 해당 계열의 막여과 장치 사양, 운전조건 및 막의 특성을 Table 1에 나타내었다.

2.3 막여과 공정 진단 기법

본 연구에서 막여과 공정 진단 기법을 개발한 가장 큰 이유 중 하나는 막오염 등 막여과 정수 플랜트 운전 시 발생하는 문제점에 대한 조기 진단을 통해 플랜트의 운영비용을 최소화시키는 것이다. 막여과 공정 진단 기법을 활용하여 문제점을 조기에 발견하여 대응한다면, 비가역적 막오염을 최소화시키고, 운전 에너지 비용이 절감되며, 궁극적으로 막 수명을 연장시키는 등 큰 효과를 얻을 것으로 기대된다. 본 연구에서 제안하는 막여과 정수 플랜트 진단 기법은 다음 절차를 따른다.

(1) 플랜트 운전 초기 데이터를 이용하여 정유량 막여과 파울링 모델의 세 가지 인자(k , n , RIF)를 구한다.

(2) 식 1 ~ 4를 이용하여, 운전 시간에 따른 보정차압 데이터를 생성한다. 이렇게 생성된 데이터는 원수의 수질, 막의 재질, 모듈 특성, 운전조건 등이 모두 고려된 예측값이 된다. 이 예측값을 벗어나게 되면, 위에서 고려한 조건들 외에 다른 특수한 조건(예를 들어, 원수 수질의 급격한 악화)이 발생했다는 의미가 된다. 따라서, 이는 막여과 공정 진단을 위한 기준이 되고, 기준 차압이라고 명명하기로 한다.

(3) 기준 차압과 실제 운전데이터로부터 얻은 보정차압을 실시간으로 비교하여 막여과 공정을 진단한다. 이때, 실제 보정차압이 기준 차압을 초과하면, 막여과 공정의 파울링 진행 속도가 예상치보다 빠르다(즉, 문제 상황)는 의미로 해석하면 된다.

막여과 정수 플랜트를 실제로 운영하면 미처 예측하지 못한 다양한 문제 상황이 발생할 수 있다. 예를 들어, 공정 원수에 조류 또는 철, 망간 등이 유입되어 급격한 파울링이 발생하거나, 밸브의 오작동으로 역세 공정이 제대로 운영되지 않았거나, 전처리 응집제 주입량 조절이 잘못되어 파울링이 발생하는 등의 다양한 사례가 있다. 이러한 문제 상황을 위 절차(실제 보정차압이 기준 차압을 초과한다면 문제 상황으로 정의)를 통해 조기에 진단할 수 있다면, 원수에 염소를 주입하거나, 운전 플렉스를 일시적으로 감소시키거나, 여과시간을 줄이거나, 역세시간을 늘리는 등과 같은 대응방법을 취하여 문제 상황으로부터 빨리 벗어날 수 있다.

3. 연구결과 및 토의

3.1 막여과 파일럿 플랜트 운전 현황

Fig. 2는 본 연구에 사용된 보정차압 데이터를 나타낸다. 플렉스는 변동없이 $1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 로 정유량 제어 방식으로 운전되었고, 3회에 걸쳐 화학세정(CIP)을 실시하였다. CIP 방법 및 효과에 대해서는 타 문헌에 기술되어 있다(Kim *et al.*, 2007). 각 CIP 시점을 기준으로 3년간의 운전 데이터를 Fig. 2에 나타난 바와 같이 Phase I, II, III, IV로 각각 분류하였다.

Fig. 2에 따르면 막여과 파일럿 플랜트의 운전 기간이 길어질수록 CIP 주기가 짧아지는 경향이 보인다. 운전 초기인 Phase I과 II의 운전 기간은 각각 10개월과 12개월이나, 운전 후기인 Phase III과 IV의 운전기간은 각각 4개월과 7개월로 운전 초기 대비 짧은 것으로 나타났다. 관련 문헌에 따르면 Phase IV 이후에는 막을 교체

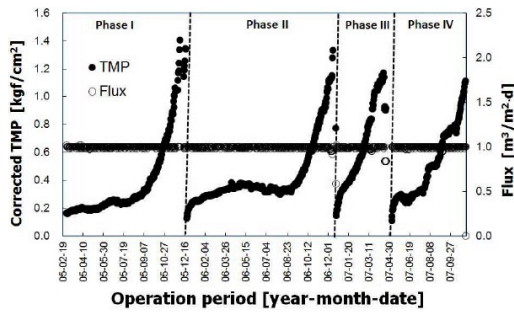


Fig. 2. Corrected TMP data during the operation period

했다고 한다(K-water, 2008). 비록, 테스트용 파일럿 플랜트 운전이긴 하지만 막 교체주기가 3년이라는 것은 상당히 짧은 편에 해당된다.

운전 기간에 따라 CIP 주기가 짧아지는 현상은 운전 지속에 따른 막오염의 축적 및 반복되는 화학세정으로 인한 막의 열화로 설명할 수 있다. 비정상적인(혹은, 예상보다 빠른) 막오염의 축적을 조기에 진단하여 이에 대응할 수 있다면, 막의 수명을 연장시킬 것으로 기대된다.

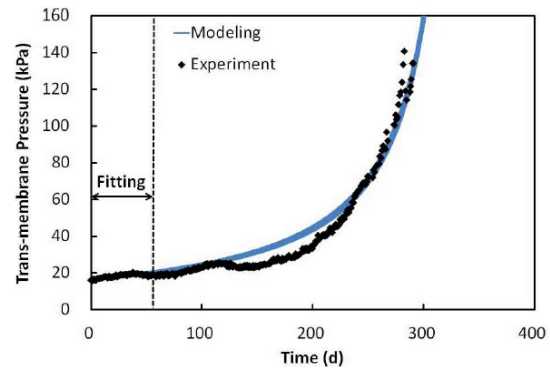
Table 2는 3년간의 운전 기간 동안 막여과 파일럿 플랜트의 원수와 생산수의 수질 분석결과이다(K-water, 2008). 막여과 공정의 특성대로 탁월한 탁도 제거를 보이고 있고, 용존성 유기탄소(DOC; Dissolved Organic Carbon), 철, 망간은 제거율은 높지 않으나, 생산수에서의 농도가 다소 낮은 경향을 보이고 있다. 이들 물질은 막 공극을 투과하거나, 공극 내부에 남아 심각한 파울링을 일으키기도 한다(Kim *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2008; Hwang *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2010).

Table 2. Raw water quality data in case of feed and product

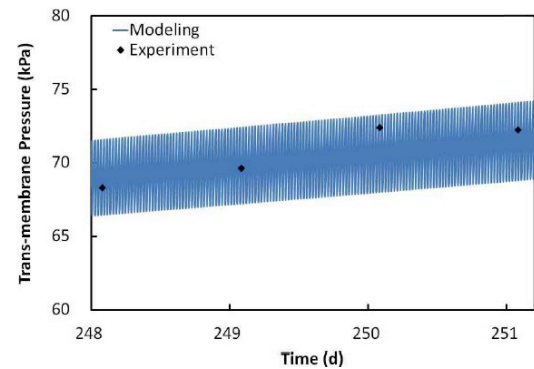
Water quality parameters	Feed water		Product	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Turbidity(NTU)	2	10	0	0,05
DOC(mg/l)	1,1	2,3	1,0	1,5
Fe(mg/l)	0,01	0,3	0,01	0,02
Mn(mg/l)	0,01	0,09	0,01	0,05

3.2 정유량 막여과 파울링 모델 검증

2.3절에 언급된 막여과 공정 진단 기법을 활용하기 위해서는, 2.2절의 방법에 따라 개발된 정유량 막여과 파울링 모델이 실제 운전 상황을 잘 반영하는 지 검증하는 과정이 꼭 필요하다. Fig. 3은 Fig. 2에 정리된 막여과 파일럿 플랜트 운전 데이터 중 Phase I을 이용하여 정유량 파울링 모델을 검증한 결과를 나타낸다. Fig. 3(a)에 나타났듯이, 초기 50일 운전 데이터를 이용하여 모델의 세 가지 인자(k , n , RIF)를 구한 후, 이를 이용하여 50일 이후의 데이터를 생성한 후 실제 플랜트 운전 데이터와 비교하였다. Fig. 3(a)의 모델링 곡선이 띠(band) 형태를 나타낸 이유는 여과 시 차압이 상승했다가 역세 시 하락하는 현상이 Fig. 3(b)와 같이 모사되었기 때문이다.



(a) 300 days data



(b) 3 days data

Fig. 3. Verification of the constant flux membrane fouling model

초기 50일 운전 데이터를 이용하여 구한 모델의 세 가지 인자(k , n , RIF)는 식 6과 같다.

$$n = 0.9396 \quad (6a)$$

$$k/J = 8.12 \times 10^{-5} \quad (6b)$$

$$RIF = \frac{R_{i,f} - R_{i,0}}{R_{i,0}} \times 0.01 \quad (6c)$$

식 6에서 n 값인 0.9396은 0과 1.5 사이에 존재하고, 1.5에 더 가깝다. 이를 해석하면, 본 연구에 인용된 파일럿플랜트에서의 막여과 파울링 메카니즘은 케이크층 형성(cake layer formation, $n=0$; Fig. 1 참조)과 공극 축소(pore constriction, $n=1.5$; Fig. 1 참조)의 중간 단계이며, 공극 축소의 경향이 더 강하다고 볼 수 있다. Table 2의 원수 수질 데이터에 따르면, 원수 탁도가 10 이하로 낮은 편이기 때문에 케이크층 형성에 의한 파울링 경향은 크게 높지 않을 것으로 볼 수 있고, 관련 문헌에 따르면 본 파일럿 플랜트는 철과 망간이 공극 내부에 석출되어 부착되는 파울링이 발생한 것으로 보고되므로(Kim et al., 2007), 식 6으로 예측할 수 있는 파울링 메카니즘이 실제 현상을 어느 정도 잘 반영하고 있다고 볼 수 있다. 게다가, 식 6의 정유량 막여과 파울링 모델 인자를 이용해서 생성된 50일 이후의 데이터는 실제 파일럿 플랜트에서 얻어진 보정차압 데이터와 아주 정확하게 일치하지는 않지만 유사한 경향을 보인다. 따라서, 본 연구를 통해 개발된 모델링 기법은 실제 플랜트의 운전 상황을 적절히 모사하고 있다는 결론을 내릴 수 있다.

3.3 막여과 공정 진단 기법 적용 사례

본 절에서는 2.3절에 제시된 막여과 공정 진단 기법을 Fig. 2의 실제 막여과 파일럿 플랜트 운전 데이터에 적용한 결과를 제시하였다. Fig. 3(a)에 의하면, 기준 차압(모델링을 통해 생성

한 차압 데이터)과 실제 보정차압의 차이가 거의 미미하다. 이는 차압 상승이 공정 원수와 막 모듈 재질의 상호작용에 의한 파울링 메카니즘에 의해 이루어졌다는 의미로 해석될 수 있다. 즉, 신규 막모듈을 설치하여 운전을 시작한 단계인 Phase I에서는 큰 문제 상황이 발생하지 않았음을 뜻한다. 다만, 운전 시작 후 270일 가량이 지나면 실제 보정 차압이 기준 차압을 초과하기 시작하므로 이를 문제 상황 발생 시점으로 볼 수 있다.

Fig. 4는 Phase II, 즉 Phase I 종료 후 CIP를 실시한 후의 운전 데이터를 이용하여 본 연구에서 개발된 진단 기법을 적용한 사례이다. 기준 차압은 Phase I의 초기 데이터(50일)를 이용한 모델링 인자(k , n , RIF ; 식 6 참조)를 이용하여 생성하였다. Phase II의 운전 전반기에는 실제 보정차압이 기준 차압보다 높았는데, 이는 문제 상황으로 해석될 수 있다. 그러나, 이러한 문제 상황이 200일 가량 지속된 후, 다시 실제 보정차압이 기준 차압보다 하락하였다. 즉, 문제 상황(기준 차압 < 실제 보정차압)이 별다른 조치 없이 지속되다가 정상 상태(기준 차압 \geq 실제 보정차압)로 회복된 것이다. 3.1절에서 언급되었듯이 Phase II은 12개월동안 안정적으로 운영되었다. 이 사례를 통해 우리는 실제 보정차압이 기준 차압을 초과하였다고 해도 큰 문제가 발생하지 않을 수 있다는 잠정적인 결론을 낼 수 있다. 이는 2.3절에서 제안한 막여과 공정 진단 기법의 신뢰

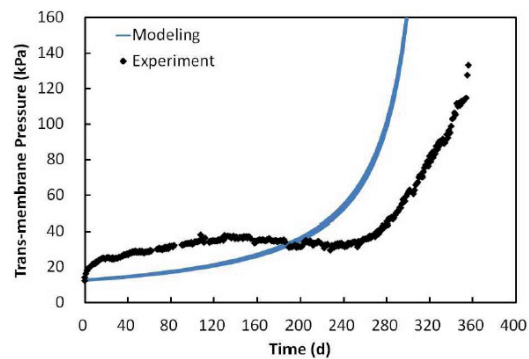


Fig. 4. Comparison between model prediction (baseline for the process diagnosis) and experimental data in phase II of operation period

성에 큰 타격을 줄 수도 있는 결론이다.

Fig. 5는 Phase III의 운전 데이터를 이용하여 막여과 공정 진단 기법을 적용한 사례를 나타낸다. Phase II 진단 사례와 유사하게 운전 초기에 문제 상황(기준 차압 < 실제 보정차압)이 발생한다. Fig. 4의 사례와 다른 점은 문제 상황이 운전 기간이 종료될 때(즉, CIP 시기가 도래할 때)까지 지속된다는 점이다. 이 경우는 본 연구에서 제안한 막여과 공정 진단 기법이 제대로 작동한 경우이다. 즉, 진단 기법에 의해 문제 상황이 발견된 초기(Fig. 5 참조)에 이를 해결하기 위한 조치를 적절히 취했다면, Phase III의 운전 기간이 Phase I, II와 마찬가지로 더 길어질 것으로 가정해 볼 수 있다.

Fig. 6은 Phase IV의 운전 데이터를 이용하여 막여과 공정 진단 기법을 적용한 사례를 나타낸다. 운전을 시작한 후 40일 동안은 정상 상태

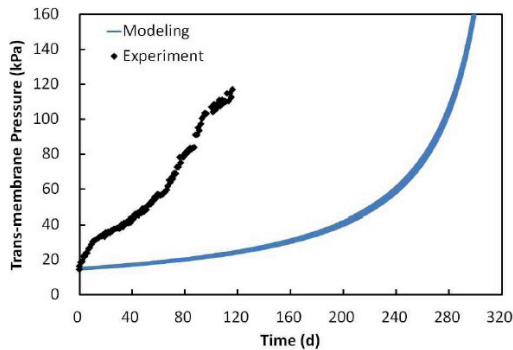


Fig. 5. Comparison between model prediction (baseline for the process diagnosis) and experimental data in phase III of operation period

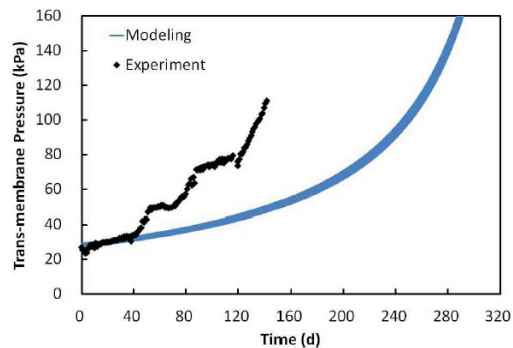


Fig. 6. Comparison between model prediction (baseline for the process diagnosis) and experimental data in phase IV of operation period

(기준 차압 \geq 실제 보정차압)였지만, 이후 문제 상황(기준 차압 < 실제 보정차압)에 돌입하게 되고 CIP 시기가 될 때까지 정상 상태로 회복되지 않았다. 즉, Phase III 진단 사례와 유사하게 본 연구에서 제안한 막여과 공정 진단 기법이 제대로 작동한 경우이다.

위에서 살펴본 진단 사례를 통해, 본 논문의 2.3절에 제안된 막여과 공정 진단 기법을 일부 수정할 필요성을 인지할 수 있다. Fig. 4의 Phase II 진단 사례를 보면, 운전 초기에 문제 상황이 발생한 것으로 진단이 되었지만 실제로는 큰 문제가 발생하지 않았다. 이러한 경우가 발생하지 않도록 하기 위해 문제 상황 판단을 위한 제한 조건을 추가할 필요가 있다. 다시 Fig. 4를 보면, 문제 상황에서도 실제 보정 차압이 높지 않은 상태(40 kPa 미만)를 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 이를 문제 상황 여부를 결정하기 위한 추가 조건으로 선정하는 방안을 검토해 볼 수 있다.

만약, 실제 보정 차압이 현장 특성에 맞는 설정값(본 연구의 사례에서는 0.4 bar)을 넘는 조건과 기준 차압을 넘는 조건, 두 가지를 동시에 만족시킬 경우를 문제 상황으로 정의한다면, 본 연구에서 제시된 Phase I, II, III, IV에 대한 문제점 진단을 정확하게 할 수 있다. Phase I(Fig. 3(a))의 경우에는 270일 이후 문제 상황 발생, Phase II(Fig. 4)는 문제 없음, Phase III(Fig. 5)은 30일 이후 문제 상황 발생, Phase IV(Fig. 6)는 50일 이후 문제 상황 발생과 같은 진단 결과를 내릴 수 있고, 이는 문제점을 조기에 해결하는 데 반드시 필요한 정보가 될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 정유량 막여과 파울링 모델을 이용하여, 막여과 공정 진단에 활용하는 기법을 개발하였다. 이는 운전 초기 데이터 및 모델링 수식을 이용하여 플랜트 현장의 파울링 메커니즘을 반영한 기준 차압 데이터를 생성하고, 이를

실제 보정차압 데이터와 비교하여 막여과 정수 플랜트에서 발생할 수 있는 문제 상황을 조기에 판단할 수 있는 기법이다.

본 연구에서 제시한 4가지 진단 사례 중 한 가지 사례에서 볼 수 있듯이, 단순히 실제 보정차압과 기준 차압의 비교만으로는 정확한 진단이 되지 않고 현장 특성에 맞는 설정값(본 연구의 경우 40 kPa)을 추가 제한 조건으로 두면 신뢰성 있고, 시기 적절한 문제 상황 판별이 가능하였다. 이와 같이, 좀더 다양한 막여과 정수공정 운전 사례에 본 막여과 공정 진단 기법을 적용하여 문제 상황 판별 조건을 좀더 구체화할 여지는 있으나, 본 연구에서 제시된 진단 기법만으로도 실제 운영되고 있는 막여과 정수장에 충분히 적용되어 운영 효율화에 크게 기여할 것으로 기대가 된다.

사 사

이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PKS-2010-4).

참고문헌

Chellam, S., Cogan, N.G. (2011) Colloidal and bacterial fouling during constant flux microfiltration: Comparison of classical blocking laws with a unified model combining pore blocking and EPS secretion, *J. Membr. Sci.*, 382, 148-157.

Grace, H.P. (1956) Structure and performance of filter media, *AIChE J.* 2, 307-315.

Ho, C.C., Zydney, A.L. (2002) Transmembrane pressure profiles during constant flux microfiltration of bovine serum albumin, *J. Membr. Sci.*, 209, 363-377.

Hwang, Y.J., Lim, J.L., Choi, Y.J., Wang, C.G. (2009) Effect of coagulation on ceramic microfiltration membrane fouling, *Journal of the Korean Water and Wastewater*, 23(4), 459-469.

K-water (2008) Development of high efficiency advanced drinking water treatment technologies for producing high quality drinking water, Report ID: KIWE-WRC-08-10, Korea Water Resources Corporation, Korea.

Kim, C.H., Lim, J.L., Lee, B.G., Chae, S.H., Park, M.G., Park, S.H. (2007) Characterization of membrane fouling and its optimal chemical cleaning method in MF process using D dam water, *Journal of the Korean Water and Wastewater*, 21(5), 559-569.

Kim, C.H., Lim, J.L., Kang, S.H., Kim, S. (2008) Long term evaluation of UF membrane process using river-bed water, *Journal of the Korean Water and Wastewater*, 22(4), 429-436.

Kim, S., Kim, C.H., Kang S.H., Lim, J.L. (2010) Long term operation of microfiltration as a pretreatment for seawater reverse osmosis processes, *Journal of the Korean Water and Wastewater*, 24(6), 735-742.

Kim, S., Kim, M.J., Lim, J.L., Park, J.Y. (2012) Effect of flux fluctuation on the fouling in a real-scale membrane water treatment system for smart water grid, The fifth conference on the Challenges in Environmental Science and Engineering, Melbourne, Australia.

Park, N.S., Kim, S.S., Chae, S.H., Kim, S. (2012) The effect of fluctuation in flow rate on the performance of conventional and membrane water treatment for a smart water grid, *Desalin. Water Treat.* 47, 17-23.

Sioutopoulos, D.C., Karabelas, A.J. (2012) Correlation of organic fouling resistances in RO and UF membrane filtration under constant flux and constant pressure, *J. Membr. Sci.*, 407-408, 34-46.

Sun, X., Kanani, D.M., Ghosh, R. (2008) Characterization and theoretical analysis of protein fouling of cellulose acetate membrane during constant flux dead-end microfiltration, *J. Membr. Sci.*, 320, 372-380.