

MBR 공정에서 간헐공기주입에 따른 겔층 제거 메커니즘

최영근·권오성·박희성·노수홍[†]

연세대학교 환경공학부
(2006년 7월 22일 접수, 2006년 8월 25일 채택)

Mechanism of Gel Layer Removal for Intermittent Aeration in the MBR Process

Young Keun Choi, Oh Sung Kwon, Hee Sung Park, and Soo Hong Noh[†]

Dept. of Environmental Engineering, Yonsei University
(Received July 22, 2006, Accepted August 25, 2006)

요약: 본 연구의 목적은 침지형(YEF 750D-2) 모듈을 적용하여 공기유량에 따른 유체 유속과 간헐적인 세정공기의 공급에 의한 오염제거를 평가하는 것이다. 공기유량에 따라 모듈의 유체 유속은 선형적으로 증가하였으며, MLSS의 농도가 1,000 mg/L 증가할 때 마다 $3 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{min}/\text{sec} \cdot \text{L}$ 의 비율로 유체 유속이 감소하였다. 세정공기의 공급이 정지되는 시간에 전여과가 일어나 흡인여과 시간 동안 겔층 위에 케익층이 형성되었다. 20초 정지와 20초 공기공급의 간헐공기주입으로 형성된 케익층이 역세정에 의하여 제거되면서 압력증가율이 가장 낮게 나타났다. 겔층이 제거되는 메커니즘은 세정 공기공급을 교대로 하여 겔층 위에 케익층을 형성시켜 케익층이 제거될 때 겔층이 함께 제거되는 원리로 설명할 수 있다.

Abstract: The purpose of this study was to investigate the effect of an intermittent aeration mode to reduce the membrane fouling in a submerged membrane process using the specifically devised module (YEF 750D-2). The fluid velocity on the module increased with increasing the supplied air volume, and decreased with the increment of MLSS in the biological reactor. The reduction rate of the fluid velocity was found to be $3 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{min}/\text{sec} \cdot \text{L}$ per 1,000 mg MLSS/L increased. In the operation of the intermittent aeration, the intermitted stop of the aeration provoked the formation of a cake layer on the gel layer which was previously formed during the aeration, resulting in the highly increased TMP level. However, the TMP level could be significantly lowered by the subsequent backwashing and aeration that effectively removed the cake along with the gel layer on the membrane surface. In this study, the optimum condition for the intermittent aeration was determined to be aeration for 20 sec and pause for 20 sec.

Keywords: submerged module, fluid velocity, intermittent aeration, gel layer, cake layer

1. 서론

MBR (Membrane Bio-Reactor)공정은 많은 장점에도 분리막의 오염은 여전히 극복해야 할 제한적 요소로 작용하고 있다[1]. 분리막의 여과 중에 동반되는 막오염 현상은 운전 압력의 상승과 처리수량의 저하 등으로 막 분리 공정의 경제성을 감소시키는 주요 원인이 되고 있다. 막오염에 주요영향 인자는 크게 세 가지로 구분할 수 있다[2]. 첫 번째로 분리막 자체의 특성, 둘째로 분리막의 운전변수이며, 셋째는 여과대상 물질의 물리 화

학적 특징이다. 또한 간헐운전 및 역세정[3,4], 화학적 세정[5] 및 세정공기량[6,7] 등은 막오염을 제어 할 수 있는 요소이다. 최근 Yoon[8] 등은 실증 MBR 반응조에 고분자 물질을 투입함으로써 플럭스의 향상과 세정공기의 절약을 얻을 수 있었다고 보고하였다. 따라서 오염제어 전략을 수립함에 있어서 분리막의 오염현상을 근본적으로 이해하는 것이 선결되어야 한다.

MBR에서 분리막 표면에 농도분극 및 케익의 축적을 억제하기 위하여 공기에 의한 세정을 실시한다. Shimizu 등[9]은 공기세정에 의하여 플럭이 0.8~100 μm 의 범위를 나타낸다고 보고하였으며, Zhang 등[10]도 미생물의 플럭이 활성슬러지에 비하여 매우 작은 30 μm 이하

[†]주저자(e-mail : drnoh@yonsei.ac.kr)

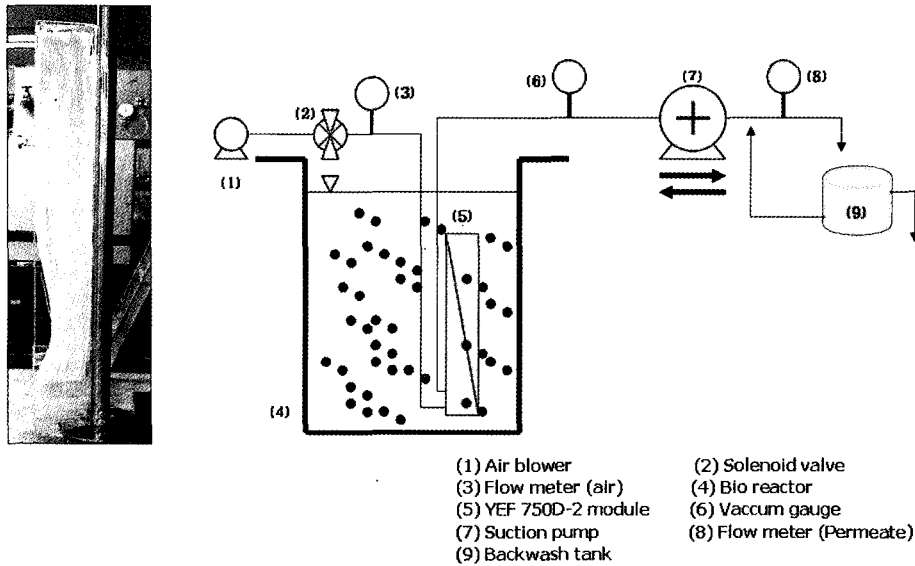


Fig. 1. Picture of YEF module (left) and submerged MBR system (right).

로 유사한 결과를 보고하였다. 활성슬러지법에 비하여 작은 크기의 플록 및 입자들은 분리막 표면에 쉽게 정착 또는 흡착 되어 젤층을 형성하게 된다. 분리막 표면에 공기와 유체의 선속도가 크면 클수록 플록의 분산으로 크기는 상대적으로 미세해지며, 여과압력 의하여 공극 및 표면에 정착된다. Fane 등[11], Howell 등[12]은 미세한 입자들이 농도분극, 정착 및 흡착 그리고 젤 또는 케익 층으로 발전하여 여과수량의 저하를 나타내며, Zydney 등[13]은 작은 입자는 매우 안정하며 분리막 표면에 얇은 케익 층(젤 층)을 형성하고 이 층은 매우 높은 분리막 저항으로 나타내며 상대적으로 케익은 낮은 수리학적 저항을 가지고 있다고 보고하였다. 또한 분리막 표면에 축적되는 물질들은 서로 다른 저항을 나타내며[14], Song[15]과 Altmann 등[16]은 분리막 표면에 정착되어있는 물질들의 크기, 층의 높이 및 부피 분율이 클수록 분리막 표면에서 제거되기 쉽다고 하였다. 이러한 것은 분리막 표면의 오염 층이 여과대상 물질과 평형에 도달하여 오염 층의 제거를 위한 힘이 여과압력에 의하여 분리막 표면에 오염 층이 누적되는 힘과 균형이 깨지는 현상으로 설명할 수 있다.

본 연구에서는 침지형 YEF (Yonsei End Free) 750D-2 모듈[17,18]을 실증 MBR 시스템에 적용하여 운전조건에 따른 오염현상을 살펴보았다. 분리막 표면에 부여되는 공기량에 따른 유체의 유속을 조사하였으며, 분리막 세정을 위한 공기의 주입 주기를 조정하여 분리막 표면

에 형성되는 젤층과 케익층의 오염이 제거되는 메커니즘을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. YEF 750D-2 모듈

YEF 750D-2 중공사 분리막 모듈은 전체길이가 2,135 mm인 사다리꼴 모양의 아크릴 재질 하우징 안에 중공사 분리막이 충전 되어있고, 모듈 하부에는 투과수의 수집을 위한 콜렉터와 세정공기가 나오는 산기장치기 일체형으로 구성되어 있다(Fig. 1). 사용된 중공사 분리막은 고정경계면에서부터 100 mm까지 접착제 계열의 EVA로 막면에 직접 코팅을 실시하여 고정경계면에서 직접 분출되는 세정공기로부터 파손의 위험을 최소화하였다. 중공사 분리막의 끝 부분은 자유단의 형태로 구성하기 위하여 열에 의한 봉인을 하였다. 아크릴 재질의 하우징 하부에는 유체의 유입구가 사각(10×14 cm)으로 구성되어있어 산기관에서 분사된 세정공기가 하우징을 통하여 상부로 유출될 때 여과유체가 유입되는 에어리프트형 모듈이다. 중공사 분리막은 PAN 재질에 공경은 100,000 Da, 외경/내경은 1.4/0.8 mm이며, 유효길이와 분리막 면적은 1,800 mm와 23 m²이다.

2.2. 실험장치

Fig. 1의 MBR 장치도에서와 같이 YEF 750D-2 모듈

을 연세대학교 원주캠퍼스 MBR 하수처리장의 폭기조에 침지시키고, 여과 펌프는 기어플렉스 펌프(gear flex pump GW 32, 대성산업펌프)를 사용하였으며, 펌프 후단에 투과유량 측정을 위한 유량계(Promag30, Endress Hauser)와 압력계(PMC731, Endress Hauser)는 모듈과 펌프사이에 설치하였다. 감압여과 및 역세정은 정유량(constant flow)방식으로 PID control (MSC-3)로 설정한 투과량을 유지하도록 기어플렉스 펌프를 제어하였다. 세정공기의 유입과 중단은 시간설정에 의한 솔레노이드(solenoid) 밸브의 개/폐로 제어하였다.

2.3. 실험방법

유속계(BFM002, Valeport)를 사용하여 프로펠러를 YEF 750D-2 모듈의 상부 유체와 공기의 출구의 중심에서 40~180 L/min의 공기유입량 범위에서 유속을 측정하였다. 하수처리장의 폭기조의 MLSS는 SS-1Z (Kasahara)로 측정하였으며, 범위는 3,000~7,000 mg/L의 범위였다. 감압여과 실험은 YEF 750D-2 모듈을 폭기조에 침지시키고, 플럭스에 대한 흡입압력의 변화를 측정하였다. 시간을 제어하여 솔레노이드 밸브의 개/폐로 세정공기의 정지와 유입(intermittent aeration)을 반복하여 흡인여과를 실시한 실험과 연속적인 세정공기가 유입(continuous aeration)된 실험의 흡입압력 변화를 측정하여 세정공기 제어 효과를 조사하였다. 실험 종료 후 YEF 750D-2 모듈을 제외 세정조로 옮긴 후 수도물 세정과 5,000 ppm 차아염소산나트륨 용액에서 12시간 침지시켜 오염을 제거하였다.

2.4. 실험적 가정

MBR 공정의 흡인여과에서 입자들의 점착 및 기공 막힘(pore blocking) 등의 겔 층과 케익 층 형성에 의해 주로 막 오염이 진행된다. 막표면에 오염층의 축적을 줄이기 위하여 공기세정이 일반적으로 사용된다. MBR 공정에서 막표면에 축적되는 오염층이 연속적 또는 주기적 공기세정으로 제거되는 현상을 Fig. 2에 나타내었다.

2.4.1. 연속적인 세정공기 유입

연속적인 세정공기에 의한 분리막 표면의 강한 전단력(shear rate)에 의하여 미세한 입자가 형성되며, 기공의 막힘을 일으키며, 잠재적으로는 오염제거기작에 비교적 안정한 기공 내부로의 오염(irreversible fouling)이

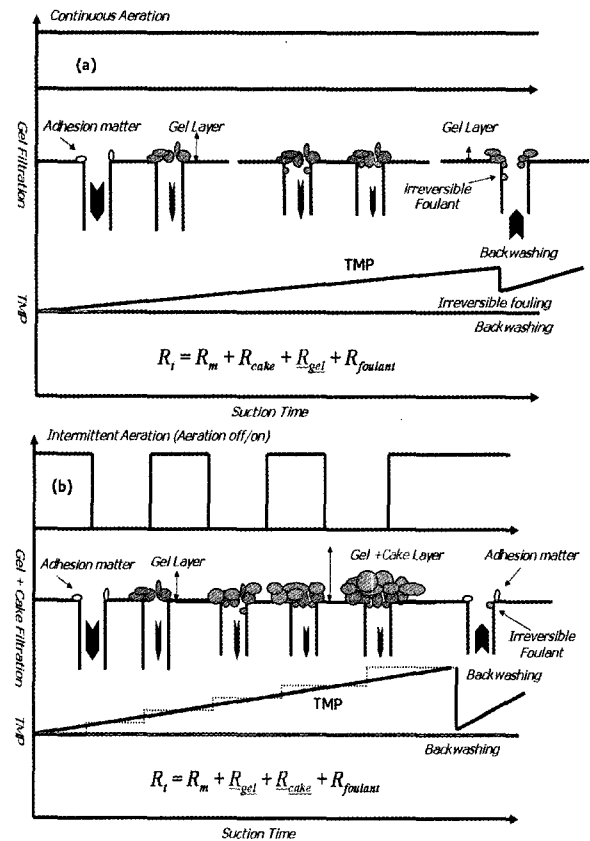


Fig. 2. Membrane fouling layer formation and removal for continuous aeration (a) and intermittent aeration (b).

진행된다. 흡인운전-정지 또는 역세정의 운전방식으로 기공의 오염을 제거하는 경우, 막혀있는 입자 중 일부만 제거되며, 지속적으로 기공 내부로의 오염이 진행되어 운전압력을 상승시킨다.

2.4.2. 세정공기의 정지와 유입

세정공기의 공급을 중지하면 케익이 형성되고, 다시 케익 위에 입자들이 축적되며, 그 두께와 부피는 세정공기의 공급시간 동안 지속적으로 증가한다. 또한 흡인 운전시간 동안 점진적으로 여과 압력은 상승한다. 흡인 운전 후 정지시간 또는 역세정에 의하여 분리막 기공 주변의 일정 두께 또는 부피를 가진 케익 층은 분리막 표면과 간격이 발생하며, 이때 막표면에 밀착된 겔층이 케익 층과 같이 제거되어 기공 내부로의 비가역적 오염을 지연시킨다. 분리막 표면에서 제거될 수 있는 케익 층의 두께 및 부피의 증가는 세정공기의 공급중단 시간에 지배를 받는다. 다른 가정은 세정공기의 공급과 중단을 연속적으로 하면 일정 두께의 케익 층은 지속적으

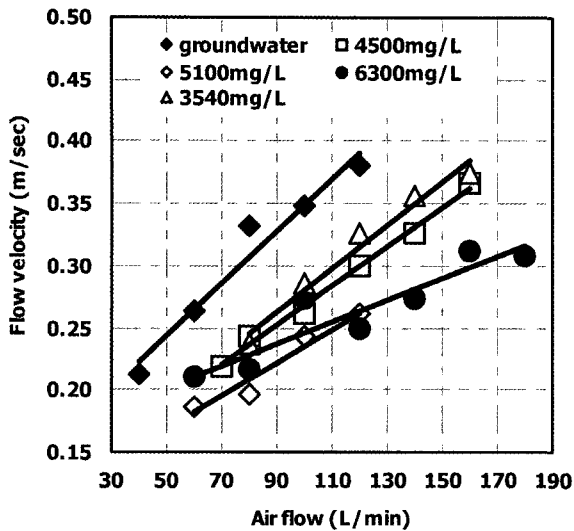


Fig. 3. Variation of fluid velocity as air flow rate increasing.

로 제거와 형성이 반복되며, 한 주기의 흡인운전 시간 동안 여과압력 곡선은 상승, 하강을 반복하며 다음 흡인운전 이전까지 전체적으로는 점진적인 증가를 나타낸다.

3. 실험결과 및 토론

3.1. MLSS와 공기유량에 대한 유체유속

Fig. 3은 공기유량에 대한 각 MLSS 농도에서 유속의 증가를 나타내고 있다. 공기유량에 따라 유속은 선형적으로 증가하는 것을 관찰 할 수 있었으며, MLSS가 가장 높은 6,300 mg/L에서는 유속의 증가율이 낮음을 나타내었다. 이것은 MLSS의 농도에 비례하여 점도가 증가된 결과로 판단되며, 0.7 m³/min의 공기량 이상에서는 0.35 m/sec 이상의 유속증가가 나타나지 않는 임계값(critical value)을 나타냈다고 보고한 Ueda 등[7]과 같은 임계값은 본 실험에서 저용한 공기량의 범위 내에서는 나타나지 않았다. Fig. 4는 Fig. 3의 공기유량에 대한 유속의 증가율(기울기)을 이용하여 MLSS의 농도가 유속의 감소율에 대한 영향을 나타내었다. MLSS 농도가 증가할수록 유속은 $3 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{min}/\text{sec} \cdot \text{L} \cdot \text{MLSS}$ 의 비율로 감소하며 MLSS 농도가 1,000 mg/L 증가 할 때 마다 유속의 감소는 약 $3 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{min}/\text{sec} \cdot \text{L}$ 정도로 감소하는 것으로 나타났다. 6,300 mg/L 이하의 MLSS 농도는 YEF 750D-2 모듈의 유속에 대한 영향력은 비

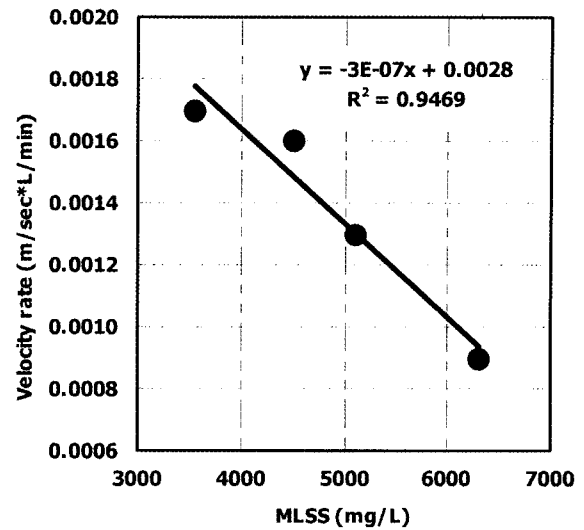


Fig. 4. Reduction of velocity rate as increasing MLSS concentration.

교적 낮은 것으로 조사되었으며, 실험범위 이상의 MLSS 농도에서 유속에 대한 실험이 추가로 이루어져야 한다.

3.2. 투과유량에 대한 영향

투과유량에 대한 여과압력의 변화를 Fig. 5에 도시하였으며, 적용된 실험조건은 Table 1에 나타내었다. 30 LMH의 실험에서는 정지시간을 대신하여 0.5 min의 역세정을 처리수로 실시했으며, 이때의 역세정 유량과 압력은 $0.5 \pm 0.02 \text{ m}^3/\text{hr}$ 및 $29,420 \pm 2,000 \text{ Pa}$ 이었다. 3,000분의 가동시간 동안 20 LMH의 투과유량 운전의 경우 10 LMH와 유사한 여과압력의 증가를 나타낸 것은 가동초기(120분)에 높은 MLSS 농도와 낮은 세정공기량으로 급격한 오염현상이 발생하여 나타난 결과로 판단된다. 투과유량 10 LMH는 동일한 운전조건에서 20 LMH에 비하여 높은 MLSS 농도와 낮은 공기유량으로 인하여 50%의 투과유량으로 운전되었음에도 불구하고 압력증가율이 유사한 결과는 YEF 750D-2 모듈의 경우 MLSS 농도보다는 공기유량의 차이가 분리막의 오염에 직접적인 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 공기량에 따라 모듈의 유속은 선형적으로 증가한다는 결과를 Fig. 3로부터 확인할 수 있다. 투과유량 30 LMH는 100분 이내의 가동시간 동안 10과 20 LMH에 비하여 20배 이상의 압력 증가를 보였다. 여과압력이 급격히 증가하는 것은 분리막의 임계 플럭스(critical flux) 이상의 투과유량이 적용되어 역세정과 높은 공기

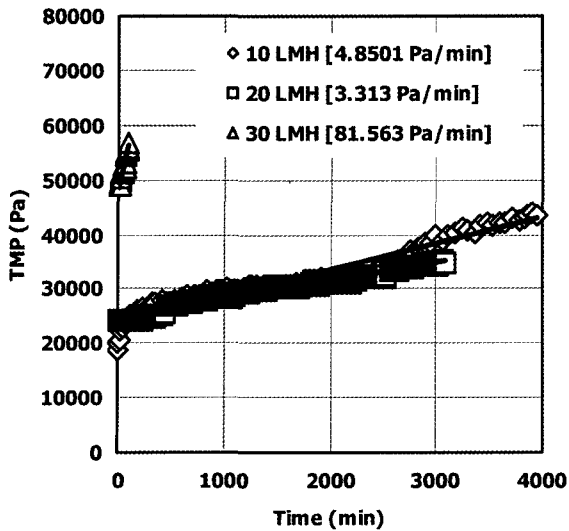


Fig. 5. TMP variation with time at 10, 20, 30 LMH.

Table 1. Experimental conditions.

Flux (LMH)	10	20	30
MLSS (mg/L)	7,750	5,600	6,400
Air dose (L/min)	80	85	120
Operation (suction/pause) (min)	12/3	12/3	14.5/0.5*

* backwashing

유량 등의 운전 변수로도 제어할 수 없는 오염이 분리막에 발생된 것으로 판단된다.

3.3. 연속 및 간헐적인 세정공기의 유입

연속적인 세정공기의 유입(실험 A, B 그리고 C)과 시간에 의한 세정공기의 정지/유입(실험 D, E, F, G 그리고 H) 등의 실험 조건들을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Experimental conditions of continuous aeration and intermittent aeration

Experiments	A	B	C	D	E	F	G	H
Flux (LMH)	20	30						
MLSS (mg/L)	6,600	6,400	6,400	5,700	4,500	4,600	3,540	4,250
Air flow rate (L/min)	120	160	120					
Filtration Mode (S/BW) (min)	continuous suction		14.5/0.5					14.5/0.5*
Aeration off/on (sec)	continuous aeration			10/20	20/20	15/20	10/10	20/20

S: suction, BW: back washing

* Pause

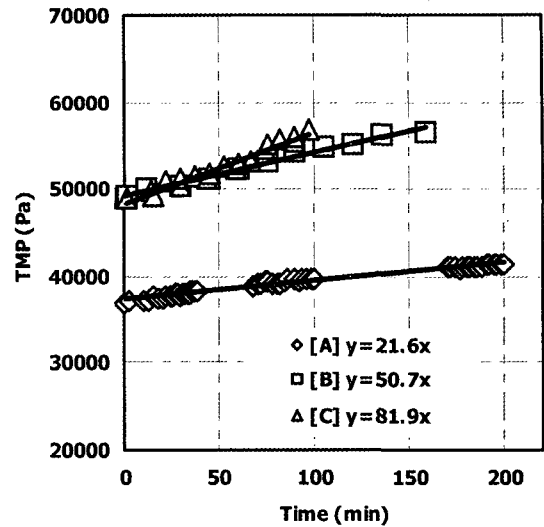


Fig. 6. Comparison of TMP for the continuous aeration.

3.3.1. 연속적인 세정공기에 대한 영향

실험 A와 B는 정지 및 역세정이 없었고, 실험 C는 역세정이 있는 조건에서 흡인여과를 하였다. 역세정 운전방법(실험 C)이 연속흡인(continuous suction)운전(실험 B) 보다 높은 압력증가율을 나타내는 것은 분리막 표면의 겔층은 매우 큰 여과저항을 야기하며, 역세정에 의하여 제거되기 힘들며 잠재적으로는 기공 내부로의 오염이 진행된다는 것을 나타내고 있다(Fig. 6). 실험 B는 연속 흡인여과에 의하여 초기 겔층 위에 케익 층이 일정 부피 이상 분리막 표면에 형성되면 세정공기에 의하여 제거된다는 사실을 보여주고 있다. 연속운전을 실시한 실험 Fig. 6의 실험 B는 흡인여과와 역세정의 조건으로 가동된 Fig. 5의 30 LMH와 실험 C보다 낮은 압력 증가율을 나타내었다. 따라서 분리막 표면에 형성된 얇은 겔 층은 정지나 역세정에 의하여 제거가 쉽

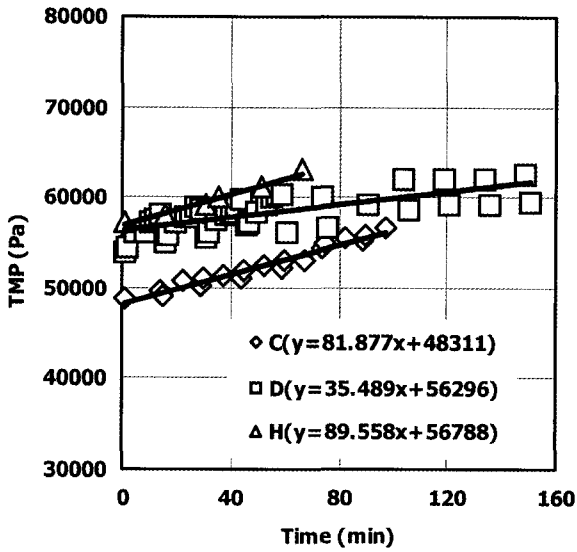


Fig. 7. Comparison of TMP for the continuous and intermittent aeration.

얇음을 보여주고 있으며[13], 얇은 겔 층이 분리막 표면에서 공정 내부로의 오염이 진행되어 지속적으로 여과저항을 증가시킨 것으로 판단된다. 실험 B는 강한 세정공기량의 조건에도 불구하고 높은 투과유량과 연속운전에 의하여 겔 층위에 케익 층이 형성될 수 있는 조건이 이루어졌으며, 형성된 겔 층 및 케익 층의 복합체가 같이 제거되면서 나타난 결과로 판단된다. 실험 A는 Fig. 5의 20 LMH의 결과와 비교하여 매우 짧은 시간 동안 높은 압력 증가율을 나타내고 있다. 이것은 연속 운전 조건이라도 낮은 투과유량에서는 겔 층이 일정 두께 내에서 저항력이 증가하며, 케익의 형성은 세정공기에 의하여 억제된다는 사실을 보여준다고 생각된다.

3.3.2. 연속적인 세정공기와 세정공기의 정지와 유입의 영향

Fig. 7에 연속적 공기세정과 주기적 공기세정에 의한 압력변화를 나타내었다. 세정공기를 정지/유입한 실험 D의 압력증가율이 연속적인 세정공기의 유입의 실험 C에 비하여 현저히 낮았다. 이러한 결과는 세정공기의 공급이 중단되는 시간에 전 여과(dead-end filtration)가 일어나 흡인여과 시간 동안 케익 층이 급속히 형성되며(Fig. 9), 역세정에 의하여 형성된 케익 층이 하부의 겔 층과 같이 제거되는 것으로 판단된다. 실험 H는 세정공기의 정지/유입에 의하여 형성된 케익 층을 제거하기 위해서는 정지의 방법으로는 분리막 표면의 오염 복합

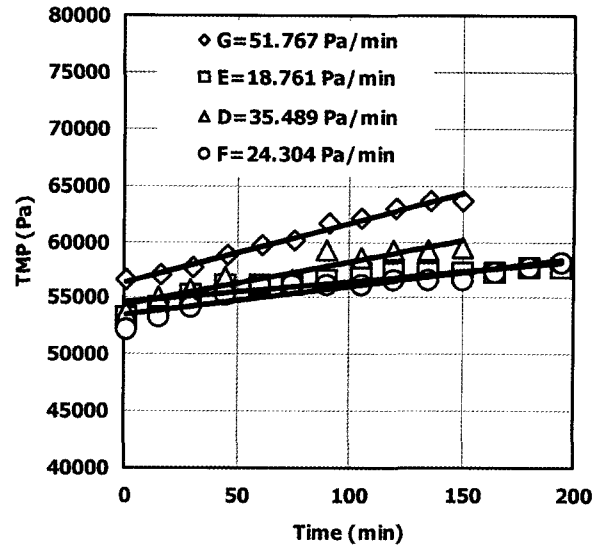


Fig. 8. Variation of TMP for the intermittent aeration.

층을 제거하기 힘들다는 것을 보여주고 있다.

3.3.3. 세정공기의 정지와 유입시간의 영향

실험 D, E, F 그리고 G는 세정공기 공급을 off/on 시간을 변화시켜 공급하였다. 역세정의 유량은 $0.95 \pm 0.02 \text{ m}^3/\text{hr}$ (45 LMH)와 $73,550 \pm 4,900 \text{ Pa}$ 의 압력으로 실시하였다. Table 2와 Fig. 8에서 보듯이 공급 정지 시간이 길수록 압력증가율이 낮은 결과를 얻었다. Fig. 9는 흡인여과시간 14.5분에서 초기 1분에서 14분 동안 증가된 압력의 백분율을 평균값으로 공기정지시간에 따른 압력증가율을 비교한 것이다. 공기정지 시간이 20초인 실험 E와 비교하여 10초인 실험 G의 압력증가율의 비율이 2.8배로 매우 높으며, 15초인 실험 F는 실험 E 보다 약간 높은 1.3배로 나타났다. 따라서 케익 층의 제거에는 효과적인 두께 또는 부피(공기정지시간)가 존재하며, 본 실험에서는 20초의 케익 형성 시간이 가장 낮은 압력증가율을 나타내었다.

3.3.4. 간헐적인 세정공기의 유입에 의한 오염제거 메커니즘

연속 흡인여과(실험 B)에 의하여 초기 겔 층 위에 케익 층이 일정 부피 이상 분리막 표면에 형성되고 세정공기에 의하여 제거되며, 세정공기 공급이 중단되는 시간에 전 여과(dead-end filtration)가 일어나 흡인여과 시간 동안 케익 층이 급속히 형성되며(Fig. 9), 역세정에 의하여 형성된 케익 층이 하부의 겔 층과 같이 제거되는 것을 확인하였다. Fig. 8에서 보듯이 공급 정지 시간

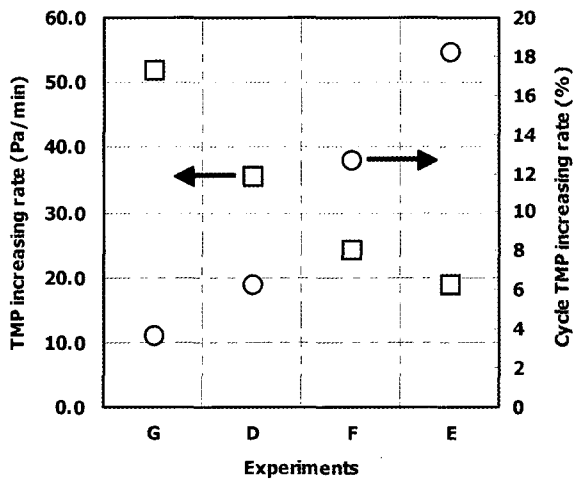


Fig. 9. The relationship between overall & cycle TMP increasing rate as intermittent time.

이 길수록 압력증가율이 낮은 결과를 얻었으며, 20초의 케익 형성 시간이 가장 낮은 압력증가율을 나타내었다. Fig. 2(b)의 가정이 이러한 사실을 표현한 것이며, 실험적 가정에서 제시한 연속적인 공기세정은 오염 층의 부분적인 제거에 의하여 잠재적으로 공경 내부로의 비가역적인 오염을 유발하게 된다. 결과적으로 화학적인 제거 수단이 요구된다고 판단된다. 반면에 세정공기의 제어는 분리막 표면과 겔 층 위에 케익 층을 형성하여 케익 층이 제거될 때 겔 층이 동시에 제거되어 여과 압력을 낮추었다고 판단된다. Zydney[12]는 얇은 오염 층 즉 겔 층은 두꺼운 케익 층에 비하여 매우 안정하고 강한 여과 저항을 갖고 있어 제거가 쉽지 않다고 하였다. 본 연구에서는 이러한 안정 층인 겔 층 위에 케익이 형성될 수 있는 메커니즘인 세정공기를 제어하였다. 분리막 표면과 겔 그리고 케익은 수차례 교대로 층을 형성하였을 것이며, 서로 다른 여과 저항과 분리막 표면으로부터 제거에 요구되는 힘이 증가되었으며, 이것은 실험결과(Fig. 8)로 확인할 수 있었다. 분리막 표면의 겔 층이 제거되는 메커니즘은 겔 층과 케익 층의 복합 층이 동시에 제거되는 원리로 설명할 수 있다.

4. 결 론

침지형 YEF 750D-2 모듈을 적용하여 공기유량과 MLSS의 농도에 대한 유체 유속을 조사하였으며, 시간의 제어에 의한 세정공기의 공급을 off/on하여 운전한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 공기유량에 따라 모듈의 유체 유속은 선형적으로 증가하였으며, MLSS 1,000 mg/L 증가할 때마다 $3 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{min}/\text{sec} \cdot \text{L}$ 의 비율로 유속이 감소하였다.

2) 세정공기의 공급이 정지되는 시간에 전여과(dead-end filtration)가 일어나 흡인여과 시간 동안 겔층 위에 케익 층이 형성되는 것을 압력의 증가로 알 수 있었다. 세정공기의 공급정지 시간에서 20초, 15초 그리고 10초의 순으로 압력증가율이 낮게 나타났다.

3) 겔층이 제거되는 메커니즘은 세정공기공급을 교대로 제어하여 겔층 위에 케익 층을 형성시켜 케익 층이 제거될 때 겔층이 함께 제거되는 것으로 설명할 수 있다.

참 고 문 헌

1. T. Stephenson, S. Judd, B. Lefferson, and K. Brindle, *Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment*, IWA Publishing, London (2001).
2. I. S. Chang, K. H. Choo, S. H. Yoon, and C. H. Lee, "Membrane Fouling Mechanisms in Membrane Coupled Bioreactor", *Proceeding of Korea-Australia Joint Symposium*, Seoul, Korea, April. 231-246 (1994).
3. P. Schhoeberl, M. Brik, M. Bertoni, R. Braun, and W. Fuchs, "Optimization of operational parameters for a submerged membrane bioreactor treating dye-house wastewater", *Separ. Purif. Technol.*, **44**, 61-68 (2005).
4. 김미희, 박진용, "제지폐수 재활용을 위한 관형 탄소계 세라믹 한외여과장치에서 물 역세척의 막오염 제어 효과", *멤브레인*, **11**(4), 190-203 (2001).
5. I. S. Chang, P. Le Clech, B. Jefferson, and S. Judd, "Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment", *J. Environ. Eng.*, **128**, 1018-1029 (2000).
6. Y. Shimizu, Y. Okuno, K. Uryu, S. Ohtsubo, and A. Watanabe, "Filtration characteristics of hollow fiber microfiltration membrane used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment", *Wat. Res.*, **30**(10), 2385-2392 (1996).
7. T. Ueda, K. Hata, Y. Kikuoka, and O. Seino, "Effects of aeration on suction preassure in a submerged membrane bioreactor", *Wat. Res.*, **31**(3),

- 489-494 (1997).
8. S. H. Yoon and H. C. John, "A novel flux enhancing method for membrane bioreactor(MBR) process using polymer", *Desalination*, **191**, 52-61 (2006).
 9. Y. Smizu, K. Uryu, Y. Okuno, and A. Watanabe, "Cross-Flow Microfiltration of Activated Sludge Using Submerged Membrane with Air Bubbling", *J. of Fermentation and Bioengineering*, **81**(1), 55-60 (1996).
 10. B. Zhang, K. Yamamoto, S. Ohgaki, and N. Kamiko, "Floc Size Distribution and Bacterial Activates in Membrane Separation Activated Sludge Processes for Small-Scale Wastewater Treatment/Reclamation", *Wat. Sci. Tech.*, **35**(6), 37-44 (1997).
 11. A. G. Fane, Ultrafiltration : factors influencing flux and rejection. In *Progress in Filtration and Separation*, ed. R. J. Wakeman, vol. 4. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co. (1986).
 12. J. A. Howell and O. Velicangil, "Theoretical considerations of membrane fouling and its treatment for protein ultrafiltration", *J. Appl. Polym. Sci.*, **27**, 21-32 (1987).
 13. A. L. Zydney and C. K. Colton, "A concentration polarization model for the filtrate flux in cross flow microfiltration of particulate suspensions", *Chem. Eng. Commun.*, **47**, 1-21 (1986).
 14. V. V. Tarabara, I. Koyuncu, and M. R. Wiesner, "Effects of hydrodynamics and solution ionic strength permeate flux in cross-flow: direct experimental observation of filter cake cross-sections", *J. Membr. Sci.*, **241**, 65-78 (2004).
 15. L. Song, "Flux decline in cross flow microfiltration and ultrafiltration: mechanisms and modeling of membrane fouling", *J. Membr. Sci.*, **139**, 183-200 (1998).
 16. J. Altmann and S. Ripperger, "Particle deposition and layer formation at the cross flow microfiltration", *J. Membr. Sci.*, **124**, 119-128 (1997).
 17. 대한민국특허, 특허번호 1005353010000 (2005).
 18. 대한민국특허, 특허번호 1005770930000 (2006).