

## 막결합형 활성슬러지 시스템에서 막오염 특성의 분석

김 재 석 · 이 정 학

서울대학교 공과대학 응용화학부  
(1998년 7월 30일 접수, 1998년 9월 8일 채택)

### Characteristics of Membrane Fouling in the Membrane-Coupled Activated Sludge (MCAS) System

Jae-Sok Kim and Chung-Hak Lee

School of Chemical Engineering, Seoul National University  
(Received July 30, 1998, Accepted September 8, 1998)

**요 약 :** 막결합형 활성슬러지 시스템의 운전에서 운전 시간에 따른 막 여과 특성의 변화를 살펴보았다. 슬러지의 순환 과정에서 전단력에 의한 플록 크기의 변화가 여과 저항에 미치는 영향을 살펴보기 위해 여과 저항 모델을 사용하였으며 또한 케이크 층의 특성 변화를 살펴보기 위해 입자의 비저항을 측정하였다. 플록의 크기는 운전 초기 4~6시간 내에 급격한 감소 양상을 보였으며 이후 서서히 감소하여 20  $\mu\text{m}$  부근의 값을 유지하였다. 운전 시간에 따른 입자의 비저항의 증가는 시간에 따른 입자 크기의 감소로부터 예상되는 결과와 잘 일치하였다. 플록의 구성 성분 중에서 용존 유기물과 미생물이 플록스 감소에 미치는 영향은 상대적으로 작았으며 콜로이드성 입자가 가장 큰 플록스 감소 요인으로 작용하였다. 미생물 플록과 비교하여 콜로이드성 입자는 높은 비저항을 가졌으며 이로 인해 상대적으로 높은 케이크 저항을 나타내었다.

**Abstract :** Membrane fouling characteristics in the membrane-coupled activated sludge system were investigated. The influence of the floc size variation on the filtration resistance was analyzed using resistance-in-series model and mixed liquor was fractionated into three components to verify which component would give rise to a major contribution to the total resistance. The microbial floc size was rapidly reduced during the initial 4~6 hours of operation, and then decreased slightly but steadily, followed by leveling off at the size of 20  $\mu\text{m}$ . The specific resistance of activated sludge increased with operation time, and measured values of specific resistance were matched well with the values estimated on the basis of the mean particle size in the mixed liquor. The contribution of soluble organics and cells to the total resistance was relatively small compared with that of the supernatant. Colloidal particles in the supernatant showed much higher specific resistance than that of microbial floc, and played the most important role in the cake resistance.

#### 1. 서 론

생물학적 폐수처리 공정은 생활 하수나 공업폐수의 처리에 가장 많이 이용되고 있다. 이러한 생물학적 폐

수처리 공정의 운전에서 가장 빈번하게 발생하는 문제는 미생물의 침강성 악화로 인한 미생물의 유실이다. 미생물의 유실은 반응조 내의 미생물 농도 감소를 가져와 처리 효율이 나빠지게 되며 유출수의 수질 저

하를 가져오게 된다. 미생물의 침강 특성은 유입 폐수의 유기물 또는 수량 부하의 변동에 크게 영향을 받으며, 이는 생물학적 폐수처리 공정의 운전을 어렵게 만드는 요인 중의 하나이다.

미생물의 침강성 악화로 인한 문제점을 해결하기 위해 침전조 대신에 분리막 시스템을 사용하려는 시도가 1960년대부터 있어 왔다[1]. 그 이후 분리막 생물반응조 (Membrane Bioreactor, MBR)는 분리막 공정의 발전과 함께 빠른 속도로 발전을 거듭하여 최근에는 상용화된 공정들이 등장하게 되었다. MBR 시스템은 미생물의 침강 특성에 영향을 받지 않고 고액 분리가 가능하기 때문에 반응조 내에 미생물을 고농도로 유지할 수 있고 양질의 여과수를 안정적으로 얻을 수 있는 장점이 있다[2-4]. 또한 슬러지 체류 시간을 충분히 길게 잡을 수 있으므로 질산화균과 같이 성장 속도가 느린 미생물의 농도가 증가하여 높은 질산화 효율을 얻을 수 있다[5].

MBR시스템은 이러한 많은 장점에도 불구하고 막오염 (membrane fouling) 때문에 플럭스가 시간이 지남에 따라 감소하므로 광범위한 적용에 제한을 받고 있다. 막오염은 주로 막 표면에서의 케이크 층의 형성, 세공 막힘, 유기물의 흡착 등의 원인에 의해 투과 저항이 증가하는 현상을 말하며, 결국 플럭스의 감소를 가져오고 막분리 공정의 경제성을 떨어뜨리는 요인이 된다.

MBR시스템에서의 막오염은 대부분이 막 표면에 형성된 케이크 층에 의한 것으로 보고되고 있다[6-7]. 케이크 층의 여과 저항 증가에 영향을 미치는 인자로는 MLSS 농도, 입자의 크기분포, 용존 유기물, 슬러지의 점도 등이 있으며 운전 조건 및 슬러지의 특성에 따라 그 영향은 전혀 다른 양상들을 보이기도 한다. 최근의 연구 결과에 의하면 미생물 플럭이 깨어지면서 나오는 용존 유기물 및 콜로이드성 입자들이 가장 큰 플럭스 제한 요소로 작용하며, 이러한 용존 유기물 및 콜로이드 입자의 주된 구성 성분은 미생물이 분비하거나 또는 미생물이 분해 (cell lysis)되면서 나오는 체외고분자 (extracellular polymeric substances, EPS)인 것으로 보고되고 있다[8-10]. 연속운전 과정에서 유출된 EPS가 막 표면에 쌓이면서 겔 층(gel layer)을 형성하여 플럭스가 급격히 감소하게 된다.

이러한 케이크 저항을 줄이기 위해 많은 연구들이 진행되고 있는데 막 표면에 부분적으로 난류를 발생 시키거나[11] 스폰지 공을 투입하는 방법[12], 주기적으로 공기 역세척 (air backwashing)을 하는 방법[13] 및 구조토로 막 표면을 코팅하는 방법[6] 등이 보고되고 있다. 또한 회전평판형 모듈을 이용하거나[14] 침적

형 분리막을 사용하는 연구[15-17]도 많이 이루어지고 있다. 이러한 연구들은 막 표면에 쌓이는 모든 입자들의 양을 줄이거나 제거하려는 시도라고 할 수 있다. 반면에 Kim 등은 막 여과저항 증가의 가장 큰 요인이 EPS인 점에 착안하여 미생물 플럭 내부에 존재하는 EPS의 양을 줄임으로서 플럭스의 향상을 얻을 수 있다고 보고하고 있다[18].

본 연구에서는 막결합형 활성슬러지 공정에서 운전 시간에 따른 미생물 플럭의 크기 변화와 여과저항과의 상관관계를 살펴보았다. 또한 슬러지의 여과저항 증가 원인을 살펴보기 위해 활성슬러지액 (Mixed liquor)을 분획하여 막 여과 특성을 여과저항 모델을 이용하여 측정하고 또한 입자의 비저항 값의 변화와 비교하여 보았다.

## 2. 이 론

### 2.1. 직렬 여과저항 모델 (Resistance-in-series model)

저항의 직렬 연결 개념에 근거한 직렬 여과저항 모델에 의하면 분리막의 플럭스는 식(1)과 같이 표현될 수 있다. 막분리 공정에서 여과저항 모델의 장점은 플럭스의 압력 의존성 및 막오염 메커니즘의 변화에 따른 막오염 효과를 정량적으로 설명할 수 있다는 점이다.

$$J = \frac{\Delta P}{\eta \cdot R_t} \quad (1)$$

$J$  : flux (m sec<sup>-1</sup>)

$\Delta P$  : transmembrane pressure (kg m<sup>-1</sup> sec<sup>-2</sup>)

$\eta$  : viscosity of the permeate (kg m<sup>-1</sup> sec<sup>-1</sup>)

$R_t$  : total resistance (m<sup>-1</sup>)

이때 전체 여과저항값  $R_t$ 는 분리막에 의한 고유 막 저항 (membrane resistance,  $R_m$ ), 막 표면 위에 형성되는 입자의 케이크 층에 의한 케이크 저항 (cake layer resistance,  $R_c$ ), 및 용질과 분리막 간의 상호작용에 의한 비가역적 표면 흡착 또는 세공 막힘에 의한 오염저항 (fouling resistance,  $R_f$ )의 합으로 표현될 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P}{\eta \cdot (R_m + R_c + R_f)} \quad (2)$$

따라서 여과저항 모델에 근거한 위의 식들에서 각

저항값들을 실험적으로 구함으로써 막여과에 있어서 각 실험 조건 및 운전 시스템에서의 분리막의 성능 및 막오염 특성을 평가할 수 있다.

### 2.2. 케이크 저항 및 비저항

전통적인 Carman-Kozeny 식으로부터 유도된 케이크 저항 (Cake resistance)과 입자 크기 (particle diameter) 및 공극률 (porosity)과의 상관관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다[19].

$$R_c = \frac{36 k \delta_c (1-\epsilon)^2}{d_p^2 \cdot \epsilon^3} \quad (3)$$

- $k$  : Carman-Kozeny constant
- $\delta_c$  : effective thickness of the cake layer (m)
- $\epsilon$  : porosity of the cake layer
- $d_p$  : particle diameter (m)

위의 식에서 케이크 저항은 입자의 크기의 제곱에 반비례함을 알 수 있다. 즉, 입자 크기가 감소할수록 케이크 저항도 증가하게 된다.

입자의 비저항 (specific resistance)은 여과 과정에서 케이크가 형성될 때 입자가 가지는 고유한 성질로 입자의 모양, 입도 분포 등에 영향을 받게 된다. Chudacek과 Fanek[20]에 의하면 막분리 과정에서의 비저항은 플럭스와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\left(\frac{1}{J}\right)^2 = \left(\frac{\eta \cdot R_m}{\Delta P}\right)^2 + \frac{2C_b \eta \alpha}{\Delta P} t \quad (4)$$

- $C_b$  : concentration of the particles (kg m<sup>-3</sup>)
- $\alpha$  : specific resistance of the particle (m kg<sup>-1</sup>)
- $t$  : filtration time (sec)

또한 케이크 저항은 입자의 비저항과 단위 막면적에 쌓인 입자의 양의 곱으로 나타낼 수 있으므로 식(3)을 변형하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{36 k (1-\epsilon)}{\rho_s \cdot d_p^2 \cdot \epsilon^3} \quad (5)$$

- $\rho_s$  : density of the particle (kg m<sup>-3</sup>)

비저항은 여과 압력에 따라 변화하게 되는데 입자의 압력 의존성은 McDonogh 등[21]에 의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \alpha_o \left(1 + \frac{\Delta P}{\Delta P_o}\right)^n \quad (6)$$

- $\alpha_o$  : specific resistance at pressure  $\Delta P_o$
- $n$  : compressibility constant

여기서  $n$ 은 압력에 따른 케이크 층의 압축성 정도를 나타낸다. 그러므로 막 면에 쌓이는 케이크 층의 특성은 입자 자체의 비저항 값과 케이크 층의 압축 계수를 통해 평가될 수 있다.

## 3. 실험

### 3.1. 활성 슬러지

활성슬러지를 하수처리장의 슬러지 반송 라인에서 채취한 후 실험실에서 합성폐수에 장기간 적응시켜 실험에 사용하였다. 합성 폐수는 주요 탄소원으로 포도당을, 질소원으로는 황산암모늄을 사용하였으며 그 상대적인 조성을 Table 1에 나타내었다. 유입수의 농도는 합성 폐수를 적절하게 희석하여 사용하였다. 활성 슬러지의 배양을 위해서는 10 L의 아크릴 반응조가 사용되었으며 그 운전 조건을 Table 2에 나타내었다. 반응조의 용존산소는 컴프레서를 통해 나오는 압축공기를 산기관을 이용하여 3 L/min 속도로 포기하여 공급하였으며 온도는 20 (±2°C)로 일정하게 유지하였으며, pH는 7 부근으로 일정하게 유지하였다. 반응조의 슬러지 체류 시간 (Solids Retention Time, SRT)은 활성슬러지 반응조에서 직접 일정량의 MLSS를 배출하여 조정하였다. 활성슬러지는 실험 조건에 따라 배양하여 정상상태를 확인한 후 여과 실험에 사용하였다.

**Table 1.** Composition of Synthetic Wastewater

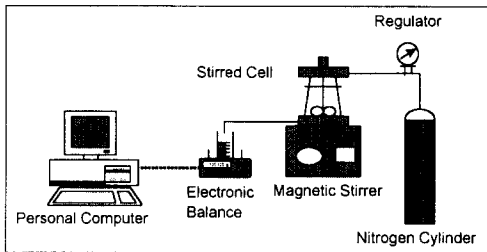
Composition	Concentration (mg/L)
Glucose	16,000
Peptone	12,000
Yeast extract	1,600
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12,800
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2,560
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	3,200
MnSO <sub>4</sub> ·4~5H <sub>2</sub> O	288
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	16
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	320
NaHCO <sub>3</sub>	2,000

**Table 2.** Conditions of Conventional Activated Sludge Reactor

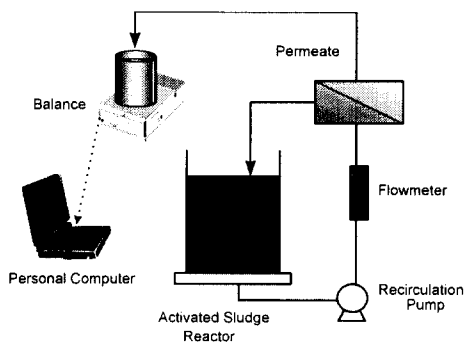
Reactor Operation Conditions	
aeration zone volume	10.0 L
settling zone volume	2.0 L
nominal flow rate	20 L/day
nominal hydraulic retention time	12 hour
nominal settling time	2.4 hour
air flow rate	2.0 L/min
pH	6.5~7.5
temperature	20(±2) °C

**3.2. 막분리 장치**

슬러지의 여과 실험은 회분식과 연속식 실험을 병행하여 수행하였다. 회분식 여과 실험에는 교반 여과셀 (stirred cell 8200, Amicon)을 이용한 종말 흐름 (dead-end flow) 여과 방식을 사용하였으며, 장치의 개략도를 Figure 1 (a)에 나타내었다. 압력은 질소 실린더를 이용하여 조절하였으며 필요에 따라 자석 교반기를 이용하여 일정 속도로 교반하였다. 막결합형



(a) Batch stirred cell unit



(b) Crossflow membrane bioreactor unit

**Fig. 1.** Experimental setup for the ultrafiltration of activated sludge: (a) Batch stirred cell unit, (b) Crossflow membrane bioreactor unit.

생물반응조의 막오염 특성을 살펴보기 위한 연속 운전 실험에는 평판형 분리막 모듈을 사용하였으며 십자흐름 (crossflow) 여과 방식을 사용하였다. 분리막은 폴리아크릴로니트릴 재질의 한외 여과막을 사용하였으며 분획분자량은 40,000 dalton의 것을 사용하였다. 막투과압력 (transmembrane pressure)은 분리막 모듈 뒤에 설치된 역가압 (back-pressure) 밸브를 사용하여 조절하였으며 활성슬러지의 순환 및 가압에는 원심펌프를 사용하였다. 슬러지의 순환 유속은 펌프 모터의 회전수를 인버터 (Starvert-G, LG)를 이용하여 실험 목적에 따라 적절하게 조절하였다. 실험의 자동 제어를 위해 전자저울, 연동펌프, 원심펌프, 인버터 및 솔레노이드 (solenoid) 밸브를 논리제어기 (Master K30, LG)에 연결하여 모든 과정을 자동으로 제어하였다. 실험에 사용된 장치의 개략도를 Fig. 1 (b)에 나타내었다.

**3.3. 슬러지 분획 및 분석**

슬러지 분획은 MLSS를 원심분리하여 미생물과 상등액 (supernatant)으로 나누고 미생물은 다시 여수에 재현탁시켜 미생물 현탁액을 얻었다. 상등액의 일부는 다시 0.45 μm 분리막 필터로 여과하여 콜로이드성 입자를 제거한 용존 유기물 용액을 얻었다. 부유 고형분 (SS)은 Standard Method법에 따라 분석하였다[22]. 입도 분석은 광산란법을 이용한 입도분석장치 (Master Sizer/E, Malvern)를 이용하여 측정하였다.

**4. 결과 및 고찰**

**4.1. 슬러지의 침강성 및 처리 효율**

활성슬러지는 정상상태에서 약 95%의 용존 유기물 (soluble COD) 처리율을 보였으며 침강성도 SVI (Sludge volume index)가 40~80으로 안정된 값을 보였다 (Table 3). 정상상태의 슬러지를 이용하여 막결합형 활성슬러지 시스템을 운전하였을 경우 처리율은 큰 변화가 없었지만 동일한 유기물 용적 부하 (Organic loading rate)에서 처리수의 COD가 훨씬 낮은 값을 보였다. 또한 처리수의 경우 SS가 전혀 없는 양호한 수질을 보였으나 슬러지의 침강성은 크게 감소하는 결과를 보였다. 침강 특성의 변화는 슬러지 순환 과정에서 전단력에 의해 미생물 플러크가 해체되었기 때문으로 사료된다. 미생물의 침강 특성 변화에 관계 없이 분리막 공정에서 완벽한 고액 분리가 이루어졌으며 분리막 여과수는 탁도가 0.1 이하로 아주 양호한 수질을 보였다.

**Table 3.** Efficiencies of Conventional Activated Sludge System and MBR System

	Activated Sludge	MBR
Hydraulic Retention Time (hour)	12	6
Sludge age (day)	8~10	30~45
Feed/Microorganism ratio (gCOD/gMLVSS)	0.5	0.3~0.5
Volumetric Loading (gCOD/L/day)	1.2	1.2
MLSS (mg/L)	2,800~3,000	3,000~5,000
SVI (mg/gMLSS)	40~80	> 300
SS <sub>out</sub> (mg/L)	30~50*	-
COD <sub>in</sub> (mg/L)	600	300
COD <sub>out</sub> (mg/L)	25~35**	10~20

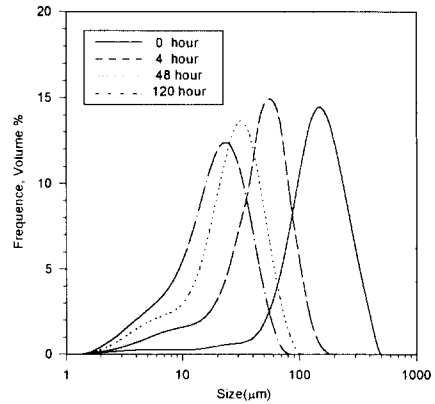
\* SS of effluent from settling tank

\*\* Filtrate of 1.2 μm GF/C filter

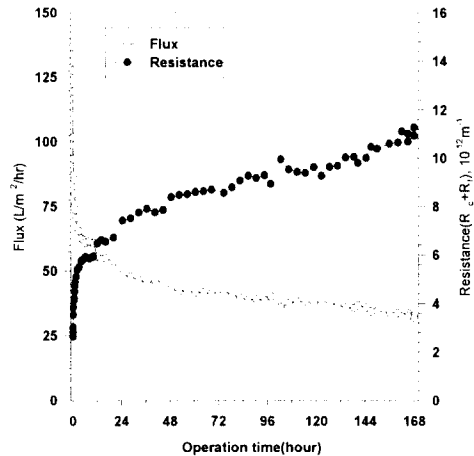
**4.2. 활성슬러지 입도 분포 및 여과 플럭스의 변화**

슬러지의 순환 과정에서의 미생물 플럭의 크기의 감소는 주로 유체의 순환 과정에서 슬러지가 펌프 및 막 모듈을 지나면서 받는 전단력에 의한 것으로 보고 되고 있다[23]. 이러한 입자 크기의 감소는 막 표면에 쌓이는 케이크 층의 특성을 변화시켜 플럭스가 달라지게 된다. Fig. 2는 운전 시간에 따른 입자 크기 분포를 보여주고 있다. 시스템이 운전 이전에 평균 입자 크기가 140 μm이었지만 운전 초기에 급격한 감소를 보여 약 4시간 후에는 46 μm으로 평균 입자 크기가 감소한 결과를 보이고 있다. 입자 크기가 4시간 이후부터는 서서히 감소하여 48시간에서 약 27 μm, 120시간 이후에는 21 μm의 평균 입자 크기를 보였으며 120시간 이후에는 더 이상 크기가 감소하지 않았다.

이러한 입자 크기의 감소는 막 표면에서의 케이크 층의 저항을 증가시켜 식(2)에 따라 플럭스의 감소를 가져올 것으로 예상된다. Fig. 3은 운전 시간에 따른 플럭스와 케이크 층의 형성 및 막오염에 의한 여과 저항 (R<sub>c</sub>+R<sub>f</sub>)의 변화를 보여주고 있다. 플럭스는 초기 4~6시간 내에 급격한 감소를 보였으며 이후에는 운전 시간에 따라 서서히 감소하는 양상을 보여주고 있다. 플럭스의 감소는 주로 막 표면에서의 농도 분극, 케이크 층의 형성, 막 내부의 세공 막힘 및 흡착에 의한 막오염 등 다양한 원인에 따라 일어날 수 있으므로 플럭스의 감소가 입자 크기 감소에 의한 것이라고 단정짓기는 어렵다.



**Fig. 2.** Variation of floc size distribution during the crossflow ultrafiltration of activated sludge.



**Fig. 3.** Flux behaviors during the crossflow ultrafiltration of MBR system with PAN membrane: crossflow velocity 2 m/s; ΔP 1 bar; temp. 20°C.

**4.3. 여과저항의 분석**

이러한 플럭스 감소의 주된 원인을 살펴보기 위해 여과 저항 모델을 사용하여 각각의 저항을 추정하고 전체 저항에서 차지하는 비율을 살펴보았다. Table 4에서 알 수 있는 것처럼 전체 저항에서 케이크 층의 저항 (R<sub>c</sub>)이 차지하는 비율이 88% 정도로 대부분이 케이크 층에 의한 저항임을 알 수 있다.

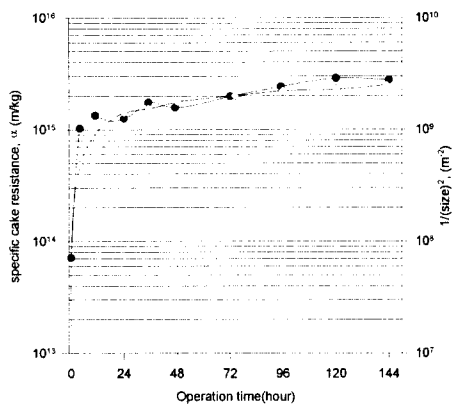
Carman-Kozeny식으로부터 유도된 식(5)에 의하면 비저항 (α)은 입자의 크기와 케이크 층의 공극률에 따라 달라지게 된다. 여과 과정에서 막 표면에 쌓이는

케이크 층의 공극률은 입자의 모양이 구형에 가까우면 입자의 크기 분포에 관계 없이 거의 일정한 값을 가지는 것으로 보고되고 있다[24]. MBR 운전 초기의 활성슬러지 플럭 모양은 구형이 아니지만 운전 시간이 지남에 따라 플러키가 깨어져 작아진 입자들은 거의 구형에 가까운 모양을 보이고 있다[25]. 이러한 경우에 케이크 저항은 주로 평균 입자 크기의 변화에 의존할 것으로 예상된다. 입자 크기와 비저항의 상관관계를 확인해 보기 위해 연속 운전 실험에서의 슬러지의 플럭 크기 및 비저항을 운전 시간에 따라 측정하여 비교하여 보았다. 각각의 비저항 값은 슬러지를 취하여 회분식 실험을 통해 교반하지 않는 조건에서 측정하였으며, 여과 과정에서의 슬러지 침강 및 압축(compaction)에 의한 오차를 줄이기 위해 초기 5분간의 실험치를 이용하였다. Figure 4에서 알 수 있는 것처럼 입자 크기의 변화로부터 예측된 값과 실험에 의해 측정된 비저항 값의 변화 그래프가 거의 유사한

**Table 4.** A Series of Resistances for Activated Sludge after 7 Days Crossflow Ultra-filtration of Membrane-coupled Activated Sludge System

Resistance (percentage)*	Measured value**
R <sub>m</sub> (%)	0.57 ( 5.2)
R <sub>c</sub> (%)	9.71 (87.8)
R <sub>f</sub> (%)	0.77 ( 7.0)
R <sub>t</sub> (%)	11.1 (100)

\* Percentage to the total resistance R<sub>t</sub>  
 \*\* Measured value given in a unit of 10<sup>12</sup> m<sup>-1</sup>



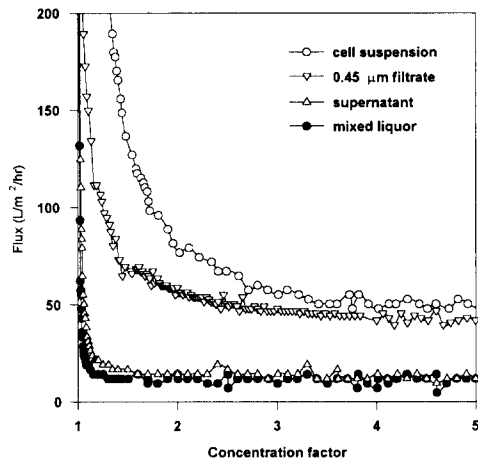
**Fig. 4.** Variation of the specific resistance and relationship with the mean particle diameter of activated sludge.

변화 양상을 보이고 있다. 이러한 결과로부터 막 표면에 쌓이는 케이크 층의 저항이 입자의 크기 변화에 직접적으로 영향을 받을 수 있었다.

**4.4. 활성 슬러지액의 분획 및 여과저항의 측정**

케이크 층의 저항 증가 원인을 좀더 자세히 살펴보기 위해 연속 운전에 의해 플러키가 해체된 슬러지를 미생물, 콜로이드성 입자, 용존 유기물의 3부분으로 분획하여 회분식 분리막 장치를 이용하여 여과하고 각 성분이 플럭스 감소에 미치는 영향을 살펴보았다. 활성슬러지액 (MLSS 3,000 mg/L)을 원심분리 (15 min, 3000 g)하여 미생물과 콜로이드성 입자를 포함한 상등액으로 나누었으며 미생물은 다시 염수에 재현탁시켜 미생물 현탁액을 얻었다. 상등액의 일부는 다시 0.45 μm 분리막 필터로 여과하여 콜로이드성 입자를 제거한 0.45 μm 여과액을 얻었다. 여과액의 탁도는 0.1 NTU 부근으로 대부분의 콜로이드성 입자들이 제거되었음을 확인할 수 있었다. 연속 운전 이전의 슬러지의 경우에는 원심분리를 수행할 경우 상등액 내에 입자가 거의 없었으나 (10 mg/L 이하) 연속 운전 이후의 슬러지는 원심분리에 의해 제거되지 않는 콜로이드성 입자들의 SS농도가 80~150 mg/L로 크게 증가하였다.

분획된 각각의 용액을 여과하였을 때의 결과를 Figure 5에 나타내었다. 농축인자 5에서 활성슬러지액 (Mixed liquor)과 상등액 (Supernatant)의 플럭스는 10~13 L/m<sup>2</sup>/hr로 거의 유사한 값을 보이고 있으며 미생물 현탁액 (Cell suspension)과 0.45 μm 여과액 (0.45 μm filtrate)은 45~50 L/m<sup>2</sup>/hr로 3배 이상의 높은 플럭스를



**Fig. 5.** Batch filtration of the fractionates of activated sludge: ΔP 1 bar; 200 rpm; temp. 20°C.

**Table 5.** A Series of Resistances for Activated Sludge after 7 Days Crossflow Ultra-filtration of Membrane-coupled Activated Sludge System

(unit:  $10^{12} \text{ m}^{-1}$ )

	$R_m$	$R_c$	$R_f$	$R_t$
mixed liquor (%)*	0.97 ( 2.5)	36.1 (94.5)	1.12 ( 3.0)	38.2 (100)
cell suspension (%)*	0.88 (11.5)	5.81 (75.9)	0.96 (12.6)	7.65 (100)
supernatant (%)*	0.88 ( 2.9)	28.7 (93.8)	1.01 ( 3.3)	30.6 (100)
0.45 $\mu\text{m}$ filtrate (%)*	0.88 (10.1)	6.81 (78.0)	1.04 (11.9)	8.73 (100)

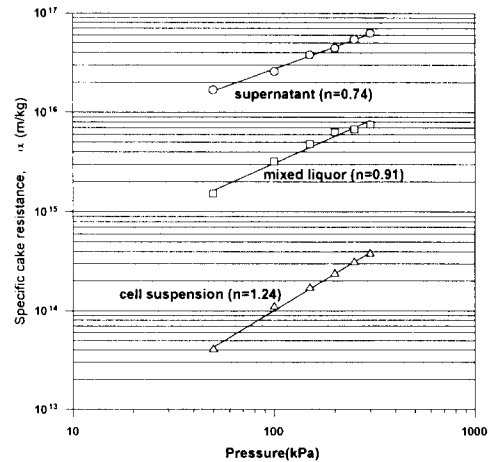
\* Percentage to the total resistance  $R_t$

보이고 있다. 이러한 결과는 활성슬러지액 중에서 상등액이 전체 플럭스 감소에 가장 큰 역할을 하고 있음을 말해 준다. 또한 0.45  $\mu\text{m}$  여과액만의 플럭스가 상대적으로 높은 것으로 보아 용존 유기물보다 0.45  $\mu\text{m}$  이상의 콜로이드성 입자가 플럭스 감소에 지배적인 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다.

각 실험에서 측정된 저항값을 Table 5에 나타내었다. 전체 저항에서 케이크 층의 저항이 차지하는 비율이 75~95%로 주된 플럭스 감소 원인이 케이크 층의 형성에 있음을 확인할 수 있다. 또한 상등액의 케이크 저항이  $2.9 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$ 으로 미생물 현탁액보다 5배 가량 높은 값을 보이고 있다. 미생물 현탁액의 SS가 약 2,800 mg/L로 상등액보다 20~25배 가량 높음에도 훨씬 더 낮은 케이크 저항을 보이고 있다. 이러한 결과는 입자 자체의 비저항의 절대적인 차이에서 기인하는 것으로 해석할 수 있다.

**4.5. 비저항의 측정**

막 표면에 쌓이는 케이크 층의 저항은 입자 자체의 비저항과 단위 막면적당 쌓이는 입자 질량의 곱으로 생각할 수 있다. 따라서 상등액과 미생물 현탁액의 입자 농도와 케이크 저항으로부터 두 입자들의 비저항의 비율을 예측할 수 있다. 막 표면에 쌓이는 입자의 양이 용액 내의 입자의 양에 비례한다고 가정할 경우 상등액 내에 있는 입자의 비저항이 미생물 현탁액 입자의 비저항보다 100배 이상 높을 것으로 예상된다. 두 입자의 비저항을 실험적으로 측정한 결과를 Figure 6에 나타내었다. 100 kPa에서 상등액 입자의 비저항은  $2.6 \times 10^{16} \text{ m/kg}$ , 미생물 입자의 비저항은  $1.1 \times 10^{14}$



**Fig. 6.** Specific resistance of the activated sludge fractionates.

m/kg로 예상된 것과 유사한 값을 얻을 수 있었다. 압축성은 미생물 현탁액은 비저항 자체는 작은 값을 보였으나 압축성은 1.24로 상등액의 0.71과 비교하여 약간 큰 값을 보였다. 이것은 콜로이드성 입자와 비교하여 미생물 플록 자체가 압력의 증가에 의해 쉽게 압축될 수 있기 때문으로 생각된다.

상등액의 입자 비저항이 미생물 입자의 비저항으로부터 예상된 값보다 높게 나온 것은 상등액 내에 존재하는 용존 유기물에 의한 저항이 포함되었기 때문으로 생각된다. 미생물 현탁액의 경우 재현탁 과정에서 용존 유기물을 완전히 배제하였지만 상등액의 경우 용존 유기물을 완전히 분리해 낼 수 없기 때문에 비저항 측정 과정에 용존 유기물에 의한 저항이 포함되어 실제보다 높은 저항을 보이게 되고 따라서 비저항이 실제보다 크게 계산되었기 때문이다.

**5. 결 론**

막결합형 활성슬러지 시스템의 운전 과정에서 플럭스의 감소를 입자 크기와 비저항의 측정을 통해 해석하였다. 슬러지의 순환 과정에서 전단력에 의한 입자 크기의 감소는 막 표면에 쌓이는 케이크 층의 저항 증가를 가져왔다. 케이크 저항의 증가는 입자 크기로부터 예측된 값과 잘 일치하였다. 플럭스 해체 과정에서 빠져 나온 콜로이드성 입자는 용존 유기물이나 미생물 자체보다 높은 케이크 저항을 보였으며 케이크 저항 증가의 주된 인자임을 확인할 수 있었다. 콜로이드성 입자의 농도는 미생물보다 상대적으로 훨씬 작은 양임에도 불구하고 높은 케이크 저항을 나타내었

으며 이것은 콜로이드성 입자 자체가 가지는 높은 비저항으로 인한 것이다.

### 참고 문헌

1. F. W. Hardt, L. S. Cleseri, N. L. Nemerow and D. R. Washington, *Journal WPCF*, **42**, 2135 (1970).
2. Y. Magara, K. Nishimura, M. Itoh and M. Tanaka, *Water Sci. Tech.*, **25**, 241 (1992).
3. S. Lubbeke, A. Vogelpohl and W. Dewjanin, *Water Res.*, **29**, 793 (1995).
4. E. B. Muller, A. H. Stouthamer, H. W. van Verseveld and D.H. Eikelboom, *Water Res.*, **29**, 1179 (1995).
5. Y. Suwa, T. Suzuki, H. Toyohara, T. Yamagishi and Y. Urushigawa, *Water Res.*, **26**, 1149 (1992).
6. R. J. Bailey, G. S. Hansford and P. L. Dold, *Water Res.*, **28**, 297 (1994).
7. I. S. Chang, J. S. Kim and C. H. Lee, *Proceedings of ICOM'96*, Yokohama, Japan, Aug. 18-23, 1996, p. 926.
8. H. Nagaoka, S. Ueda and A. Miya, *Water Sci. Tech.*, **34**(9), 165 (1996).
9. T. Mukai, K. Murakami, T. Widjaja, K. Takimoto, T. Kohno and M. Okada, *Proceedings of the 6th IAWQ Asia-Pacific Regional Conference*, Seoul, Korea, May 20-23, 1997, p. 1499.
10. J. S. Kim, C. H. Lee and I. S. Chang, *WQI'98*, Vancouver, Canada, Jun. 22-26, 1998.
11. 이정학, 화학공업과 기술, 제8권, 제4호, 414 (1990).
12. T. Okada and O. Oba, *Desalination*, **98**, 335 (1994).
13. A. G. Fane, *Proceedings of Korea-Australia Joint Seminar*, Seoul, Korea, Jun. 12-15, 1993, p. 183.
14. N. Ohkuma, M. Ohnishi and Y. Okuno, *Desalination*, **98**, 49 (1994).
15. K. Yamamoto, M. Hiasa, T. Mahmood and T. Matsuo, *Water Sci. Tech.*, **21**, 43 (1989).
16. C. Chiemchaisri and K. Yamamoto, *Water Sci. Tech.*, **28**, 325 (1993).
17. H. Kishino, H. Ishida, H. Iwabu and I. Nakano, *Desalination*, **106**, 115 (1996).
18. J. S. Kim, C. H. Lee and H. D. Chun, *Water Research* (in press), (1998).
19. M. K. H. Liew, A. G. Fane and P. L. Rogers, *Biotech Bioeng.*, **48**, 108 (1995).
20. M. W. Chudacek and A. G. Fane, *J. Memb. Sci.*, **21**, 145 (1984).
21. R. McDonogh, G. Schaule and H. C. Flemming, *J. Memb. Sci.*, **87**, 199 (1994).
22. APHA, AWWA and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed., American Public Health Association, Washington DC (1995).
23. J. S. Kim and C. H. Lee, *Proceedings of ICMST'98*, Beijing, China, Jun. 9-13, 1998, p. 156.
24. 윤성훈, 서울대학교 박사학위논문 (1998).
25. 장인성, 서울대학교 박사학위논문 (1996).