

응집플록의 특성분석을 통하여 관찰된 정밀여과 막오염 현상에 관한 연구

최양훈 · 권지향[†]

건국대학교 공과대학 환경공학과

(2005년 1월 4일 접수, 2006년 3월 8일 채택)

Investigation of Membrane Fouling in Microfiltration by Characterization of Flocculent Aggregates

Yang Hun Choi · Ji Hyang Kweon[†]

Konkuk University, Department of Environmental Engineering

ABSTRACT : Characteristics of flocculent aggregates have great effects on membrane fouling. Floc from kaolin particles gave higher permeate throughputs than floc from natural particles at the same conditions. Therefore, the objectives of this study are to thoroughly analyze characteristics of flocculated aggregates and to investigate effects of flocculated aggregates on membrane fouling. Image analysis, specific cake resistance and cake compressibility were used for characterization of flocs. Different flocculent aggregates formed with natural and kaolin particles were employed in this study. The fractal dimensions from the image analysis were $D_2 = 1.79 \pm 0.07$ for floc from natural particles and $D_2 = 1.84 \pm 0.06$ for floc from kaolin particles. The lower fractal dimension(D_2) of floc from natural particles indicated that the aggregates were more porous and less compact than floc from kaolin particles. In addition, both the specific cake resistances and compressible degrees of flocs from natural particles showed greater values than those of flocs from kaolin particles. The results implied that the porous and loose flocs from natural particles were more easily compressed on membrane surface than the dense and compact flocs from kaolin particles. The compressed flocs yielded the great hydraulic resistances by hindering the water flow through the cake layer.

Key Words : Flocculent Aggregate, Membrane Fouling, Fractal Dimension, Cake Compressibility, Specific Cake Resistance

요약 : 응집플록은 그 특성에 따라 분리막 오염에 지대한 영향을 미친다. 기존의 연구결과에서 보면, 자연입자에 의해 형성된 플록함 유수는 인공입자에 의한 플록함유수에 비하여 낮은 투과량을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 응집플록의 특성을 정량적으로 분석하고, 분리막 오염과의 상관성을 알아보려고 하였다. 이를 위해 응집 플록에 대한 image analysis, specific cake resistance 및 cake compressibility 등을 측정하였다. Image 분석은 플록의 fractal dimension을 구하는데 이용되었으며, dimension은 플록의 다공성, 크기나 표면의 거칠기를 표현하는데 유용하게 사용된다. 또한 케익 압축능은 플록이 쌓여 만들어진 막표면층의 특성을 분석하는데 사용되었다. 두 가지의 다른 특성을 가지는 플록으로서 자연입자를 핵으로 하는 응집플록과 카올린 입자를 핵으로 하는 응집플록을 선택하여 실험하였다. 실험결과에 따르면 자연입자와 인공입자에 의해 형성된 플록의 fractal dimension(D_2) 값은 1.79 ± 0.07 , 1.84 ± 0.06 을 각각 나타내었으며, 이것은 자연입자에 의해 형성된 플록이 인공입자에 의한 것 보다 더 다공성의 느슨한 형태로 존재하고 있다는 것을 나타내는 것이다. 자연입자에 의해 형성된 다공성의 느슨한 플록이 분리막 표면에서 케익층을 형성 할 때에는 상대적으로 쉽게 압축되어 케익비저항이 커지는 것을 확인하였다.

주제어 : 응집플록, 분리막 오염, 프랙탈 차수, 케익 압축능, 케익 비저항

1. 서론

수처리 공정에 적용될 수 있는 분리막은 그 특성상 수중의 입자들을 크기에 따라 선택적으로 배제할 수 있는 능력을 가지고 있다. 수질오염원이 대부분 입자상 물질인 경우에는 막분리 공정으로 쉽고 안전하게 제어할 수 있다는 것을 의미한다. 하지만, 탁도유발물질 및 용존성 유기물 등과 같은 오염물질은 여과막 표면 및 공극의 내부에 축적 또는 흡착

되어 막투과유속을 저감시키는 등 막오염을 발생시킨다.^{1,2)} 또한, 분리막의 막오염 현상은 수질 및 입자의 물리·화학적 성상에 따라 다르게 나타날 수 있다.

침지식 분리막 공정은 분리막을 침전지 내에 직접 침지시켜 막분리 여과를 수행한다. 이러한 경우 기존의 수처리 공정 중 여과지가 생략됨에 따라 공정이 차지하는 부지면적 및 부대시설의 감축 등과 같은 이점이 있다. 현재 침지형 분리막 공정은 하폐수처리와 관련하여 많은 연구가 진행 중이며, 상대적으로 정수처리 분야에서는 관련된 연구가 드문 실정에 있다.

자연원수를 대상으로 분리막 실험을 수행했을 때, 응집플록을 함유한 상태로 막분리 하는 경우가 원수를 직접여과 할

[†] Corresponding author

E-mail: jhkweon@konkuk.ac.kr

Tel: 02-450-4053

Fax: 02-454-4056

때와 비교하여 막투과유속의 저하가 작게 나타났다는 연구 결과가 있다.³⁾ 응집처리 후 응집플록이 부유하는 상태에서 막분리를 하더라도 응집되지 않은 원수에 비하여 어느 정도는 공정의 안정성이 확보 될 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 침지식 막여과의 경우 응집플록은 막 투과수량이 증가함에 따라 막 표면에 급속히 축적되어 케익층을 형성하고, 분리막의 공극을 폐쇄시켜 막의 투과능력을 저하시키는 등 궁극적으로는 막오염을 유발시킨다. 응집전처리를 하게 되면 수중에 존재하는 대부분의 오염원들이 플록으로 전환되며, 이와 같은 플록은 막오염에 있어서 결정적인 오염원으로 작용할 수 있다. 따라서 응집플록을 함유한 상태로 막분리 하는 경우, 플록의 특성을 면밀히 분석하고, 플록의 상대적인 특성에 따르는 여과막 오염 현상을 관찰할 필요성이 있다.

수처리 공정에서 발생하는 플록의 형태학적 특징을 기술한다는 것은 어려운 일이다. 왜냐하면 플록은 그 형태가 상당히 불규칙하고 무질서한 특성을 가지고 있기 때문이다.⁴⁾ 플록의 형태학적 의미를 기술하는 것으로서 fractal 개념은 플록의 형태 그리고 밀도, 다공성, 침강속도와 같은 다양한 물리적 성질을 기술할 수 있는 차수를 제시한다.⁵⁾ Fractal 개념을 통하여 얻어낼 수 있는 fractal 차원은 서로 다른 환경 조건에서 형성된 플록의 형태를 어느 정도 정량화하며, 플록의 형성 기작을 반영하기도 한다.⁶⁾ 1, 2 그리고 3의 차원을 가지는 플록의 프랙탈 차원은 아래와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 D_1 , D_2 그리고 D_3 는 각각의 프랙탈 차원의 차수를 나타낸다.

$$P \propto l^{D_1} \tag{1}$$

$$A \propto l^{D_2} \tag{2}$$

$$V \propto l^{D_3} \tag{3}$$

P 는 플록의 주변 길이, l 은 플록의 가장 긴 축, A 는 플록의 투영 단면적, V 는 플록의 부피를 나타낸다. 다공성, 밀도, 수리학적 직경 등과 같은 플록의 특성들은 우선적으로 D_2 의 함수가 되며, 플록의 크기가 증가 할수록 다공성의 성질을 나타내는 경향이 있다.⁷⁾ Fractal 차원은 식 (1), (2), (3)에 제시된 플록 각각의 특성(P , A , V)과 길이(l)에 대하여 로그 그래프를 도식화 하였을 때 제시되는 기울기가 된다. 통상적으로 프랙탈 차원은 밀도가 짙은 응집플록의 경우 2.3-2.5의 범위를 가지며, 반면에 느슨한 플록의 경우 1.7-1.8의 범위를 가진다고 보고되어 있다.⁸⁾

응집후 침전 없이 막여과 할 때 여과막 표면에 축적되는 물질은 대부분 응집플록이 되며, 이것은 케익층을 형성하게 된다. 케익비저항값과 압축능은 이러한 응집플록에 의한 케익층의 특성을 파악하기 위해 사용될 수 있다. 케익비저항을 구하는 식은 식 (4)에, 케익의 압축능력을 나타내는 식은 식 (5)에 각각 제시하였다.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu\alpha_c C}{2A^2\Delta P} V + \frac{\mu R_m}{A\Delta P} \tag{4}$$

$$\alpha_c = \alpha_o \Delta P^n \tag{5}$$

t 는 여과 시간, V 는 투과수의 부피, μ 는 점성계수, R_m 은 막 자체의 저항, A 는 막면적, ΔP 는 막간차압, C 는 원수의 입자상 물질 농도, 그리고 α_c 는 케이크비저항값, n 은 케이크 압축능을 나타낸다.

응집을 전처리로 한 침지식 막여과의 경우 응집플록과 분리막 오염과의 상관성은 심도 있게 고찰되어야 할 필요가 있다. 본 연구는 인공입자와 자연입자로 응집플록을 만들고, 형성된 플록이 막오염에 미치는 영향을 파악함으로써 응집플록의 어떤 특징이 막오염에 가장 큰 영향을 미치는지를 고찰하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험원수

실험원수를 조제하기 위해서 서울시 G 취수장으로 유입되는 전염소 처리 된 자연원수를 이용하였다. 자연원수 시료의 경우 자연입자의 특성을 반영하기 위하여 취수된 자연원수를 농축시켜 사용 하였다. 농축된 자연입자를 자연원수에 주입하여 목표로 하는 탁도, 즉 약 40 NTU가 되도록 조제하여 사용하였다. 인공원수 시료의 경우 인공입자로 kaolin(서울화성공업주식회사, 대한민국)을 사용하였고 자연원수 농축 후 상등수에 kaolin을 45 mg/L 첨가하여 목표로 하는 탁도를 조제하였다. 탁도계는 Hach 사(USA)의 2100N Turbimeter가 사용되었고, UV 흡광도는 254 nm에서 UV-Visible spectrophotometer(UV-1601, Shimadzu, Japan)를 이용하였다. UV 흡광도 측정을 위한 시료는 모두 0.45 μ m filter로 여과시킨 후 측정되었다. 본 연구에 사용된 실험원수의 특성을 Table 1에 나타내었다.

2.2. 플록형성

응집플록을 형성하기 위하여 17% Polyaluminium chloride 응집제를 3차 처리된 증류수로 약 116배 희석하여 사용하

Table 1. Characteristics of the natural and the synthetic waters used in this study

Parameters	Natural raw water	Synthetic kaolin water	Flocculated water from natural particles	Flocculated water from kaolin particles ^a
Turbidity, NTU	39.9	40.2	45.3	42.0
UV ₂₅₄ absorbance, cm ⁻¹	0.039	0.029	0.019	0.017
pH	7.0	7.0	7.24	6.56
Temperature, °C	20	20	20	20

^a [kaolin] = 45 mg/L

였다. 최적조건에서의 플록을 획득하기 위하여 응집제 주입량 결정 실험을 하였다. 플록형성 최적조건은 탁도 제거율을 기준으로 하였다. 표준 jar-test법에 따라 응집제는 6개의 반응조에 각각 0, 2, 4, 6, 8, 10 mg/L as 0.15% Al₂O₃로 주입되어 급속혼화는 200 rpm에서 30초, 완속혼화는 30 rpm에서 30분 동안 이뤄졌으며, 30분간의 침전공정을 두었다. 상정수의 수질분석 항목은 탁도, UV₂₅₄ 등이었다.

급속혼화와 완속혼화 후 침전공정을 생략한 채 응집플록이 부유하는 상태에서 채취하여 정밀여과 막분리 실험의 원수로 사용되었다. 또한 막분리 공정으로 직접 유입되는 실험원수에 함유된 플록은 이미지 분석에 사용되었다.

2.3. 케익층 비저항 및 압축능

실험원수가 막투과유속 저감에 미치는 영향과 케익비저항 및 압축능을 결정하기 위하여 정밀여과 막분리 실험이 행해졌다. 실험에 사용된 정밀여과막은 Akzo Nobel(Micro PES-FM, Germany)사에서 제조된 공극이 0.2 μm이고, 투과면적이 약 32.17 cm²인 polyethersulfone 재질의 평막이다. 분리막이 삽입되는 모듈은 Millipore(Series 8000, USA)사에서 제조되었으며, 5 L의 시료를 최대 75 psi(5.3 kg/cm²)에서 전량여과 할 수 있도록 구성되었다. bench-scale의 막분리 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 실험원수를 저류조에 저류시킨 후 N₂ 가스를 추진압으로 하여 막분리를 하였다. 플록을 함유한 실험원수의 경우 분리막 모듈로 유입되는 플록을 균일한 상태로 유지할 필요가 있다. 따라서 저류조에 magnetic bar를 넣어 시료를 혼합 시켜주었다. 분리막을 투과하여 나오는 물의 무게를 실시간으로 측정하여 막투과유속을 산출하였다. 식 (4)와 식 (5)에 따라 케익의 비저항과 압축능을 계산 하였으며, 케익 압축능 평가 실험에서는 각각 1.25, 2.5, 4.0, 5.0, 7.0 psi의 투과압력을 적용시켰다.

2.4. 플록특성 분석

플록의 이미지는 digital microscope(Digital Microscope MIC-D, Olympus, Japan)을 활용하여 촬영하였고, 이미지 분석 프

로그램(Image Pro-Plus v4.5, Media Cybernetics, Inc, USA)을 활용하여 플록의 이미지를 분석하였다. 응집플록이 막오염에 미치는 영향을 고찰하기 위해서는 막표면에 축적되기 직전의 플록이 가장 중요하다. 따라서 이미지 촬영 및 분석에 사용된 응집플록시료는 분리막이 삽입되어 있는 모듈 안에 부유하고 있는 것으로 하였으며, 외경이 약 0.4 mm인 플라스틱 재질의 피펫으로 채취하였다. 프로그램에서 분석되어져 나온 플록의 투영 단면적과 가장 긴 축의 자료를 식 (2)에 적용하여 이차원의 Fractal 차수를 구하였다. 이미지 분석에 활용된 플록의 수는 자연원수 시료의 경우 662개, 인공원수 시료의 경우 688개로서 통계학적으로 충분한 자료를 확보하였다. 입자크기분석에 사용된 기기는 MasterSizer(Malvern, USA)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 응집플록 형성 결과

응집플록이 분리막에 미치는 영향을 파악하기 위해서 응집플록 형성을 위한 응집제 주입량 결정 실험을 하였다. 응집제 주입량 결정은 용존성 유기물 제거율 및 잔류 탁도 등으로 판단 할 수 있다. 본 연구에서는 분리막에 적용되는 플록의 일관성을 나타내기 위하여 가장 크고 무겁게 형성된 플록을 이용하고자 하였다. 따라서 자연입자를 함유한 원수 및 인공입자를 함유한 원수의 응집제 주입량은 탁도 제거율을 기준으로 하였다.

최적의 플록형성 조건에 대한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 자연원수 및 인공원수 모두 응집제 4 mg/L as 0.15% Al₂O₃ 주입 시 각각 94.5% 및 93.9%의 가장 높은 탁도 제거율을 보였다. 따라서 이 후의 막여과 실험은 응집제 주입량 4 mg/L을 이용하였다. 응집제 4 mg/L를 알루미늄(Al³⁺) 이온농도로 환산한 결과 3.9 × 10⁻⁵ mol/L(log[Al] = -4.4 mol/L)이며, 반응 후 자연원수와 인공원수의 pH가 각각 7.2, 6.6이라는 점을 감안 할 때 선택된 최적 플록형성은 전형적인 sweep-floc mechanism에 따르는 것으로 판단되었다.

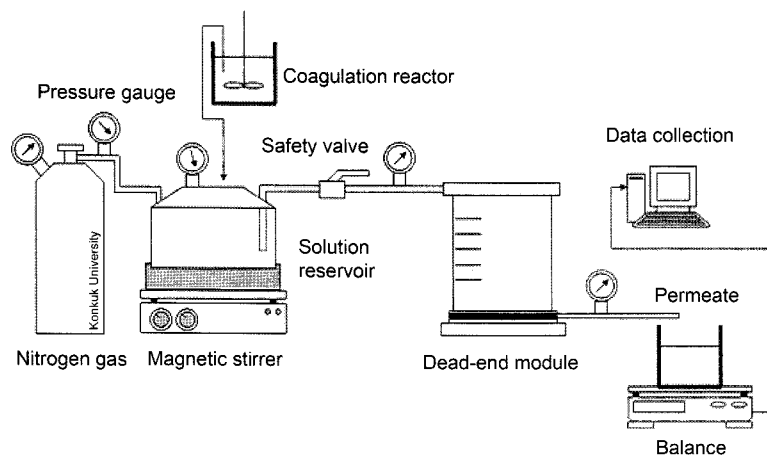


Fig. 1. Schematic diagram for a batch stirred cell(dead-end filtration).

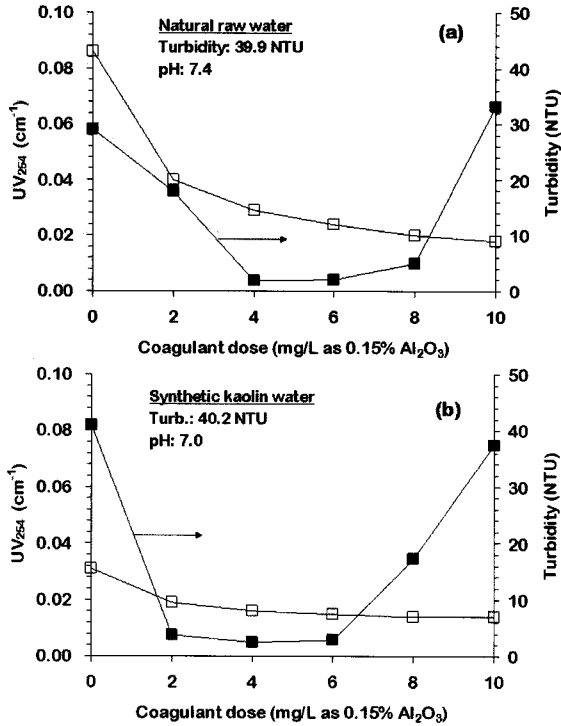


Fig. 2. Determination of coagulant doses for the optimized floc formation in this study.

인공원수의 경우 응집제 주입 초기 단계(2 mg/L 주입 시 3.8 NTU)부터 급격한 탁도 제거 현상이 나타나는 반면에, 자연원수의 탁도 저감율은 상대적으로 완만한(2 mg/L 주입 시 18.0 NTU) 형태를 이루었다. 시료의 특성에 따라 응집제 주입 시 입자의 불안정화 및 플록형성 속도가 다를 수 있음을 나타낸다.

3.2. 응집플록에 의한 분리막 오염

자연입자 및 인공입자에 의해 형성된 플록함유수를 이용한 막여과 실험을 수행하고, 나타난 막오염 특성을 막투과유속 저감, 막오염지수 그리고 총저항의 측면에서 살펴보았다. 막투과유속 저감에 관한 결과는 다음 Fig. 3에 제시되어 있다. 초기 막투과유속의 50%가 감소되는 동안 자연입자에 의해 형성된 플록함유수는 약 333 mL, 인공입자에 의해 형성된 플록함유수는 약 740 mL의 투과량을 보였다.

막오염을 정량화함에 있어서 일반적으로 총저항값을 사용하게 되는데, 이것은 막자체저항, 케익저항 그리고 기타저항 등의 합으로 표현된다. 총저항(R_t)의 경우 두 시료가 거의 같은 값을 보였지만, 케익비저항의 경우에는 자연입자에 의해 형성된 플록함유수가 약 1.7배 높은 값을 보여줌으로서, 자연입자에 의해 형성된 플록함유수가 분리막 오염에 좀 더 부정적인 영향을 미친다는 사실을 확인 하였다. 케익저항에 대한 내용은 다음 절에서 더 자세히 언급할 것이다.

막오염 지수는 Merin과 Cheryan(1980)이 제안⁹⁾한 아래의 모델식을 이용하였다.

$$J = J_0 V^{-b} \tag{6}$$

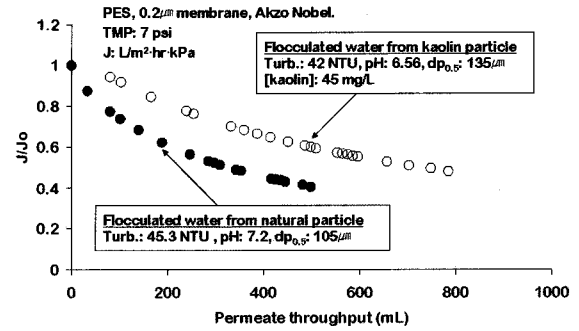


Fig. 3. Permeate flux decline of flocculated waters.

Table 2. Resistance values and membrane fouling index of flocculated water from different primary particles

Samples	Resistance			Fouling Index	
	Membrane, R _m (m ⁻¹)	Cake, R _c (m ⁻¹)	Total, R _t (m ⁻¹)		
Flocculated water from natural particle	4.14×10 ¹⁰	6.62×10 ¹⁰	1.08×10 ¹¹	1.44×10 ¹⁰	0.36
Flocculated water from kaolin particle	4.29×10 ¹⁰	6.58×10 ¹⁰	1.09×10 ¹¹	8.74×10 ⁹	0.29

J는 시료의 막투과유속, J₀는 초기 막투과유속, V는 투과량, b는 오염지수를 가리킨다. 막오염 지수는 막투과량에 대한 막투과유속의 저감 정도를 나타낸 것으로서 총저항과 유사한 개념으로 사용된다. 자연입자 및 인공입자에 의해 형성된 플록함유수의 막오염 지수는 각각 0.36 및 0.29로 확인되었다. 각각의 시료에 대한 저항값과 막오염지수를 Table 2에 정리하였다.

3.3. 케익 저항 및 케익 비저항

막표면에 축적된 오염원은 케익층을 형성하여 여과흐름을 방해하는 저항을 일으킨다. 이와 같은 케익저항은 케익질량을 단위 막면적으로 나눈 값인 케익부하(m)와 상관성을 가지며, 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.¹⁰⁾

$$R_c = m' \alpha_c \tag{7}$$

위 식에 제시된 α_c는 막표면에 축적된 케익층의 비저항값을 나타낸다. 케익 비저항(α_c)은 식 (8)에서 보듯이 플록의 크기(d_p) 및 케익층의 다공성(ε_c) 등에 영향을 받으므로, 플록을 최적화 시켜 형성시킴으로서 분리막 오염정도를 저감시킬 수 있다.¹⁰⁾

$$\alpha_c = \frac{36K(1 - \epsilon_c)}{\rho_p d_p^2 \epsilon_c^3} \tag{8}$$

(K: empirical Kozeny constant)

케익비저항은 막표면에 형성된 케익의 물리적 특성(공극 및 크기 등)과 상관성이 높기 때문에 케익비저항이 크다는 것은 케익층의 공극이 작고 조밀하다는 것을 나타낸다. 따라서

케익층을 통과하는 유체의 흐름이 상대적으로 억제되어 투과 유속의 저하가 일어난다. 분리막 실험에 있어서 막간차압을 증가시키에 따라 자연입자 및 인공입자에 의해 형성된 플록이 가지는 케익저항 및 케익비저항값을 Fig. 4에 제시하였다.

막간차압이 증가함에 따른 케익저항은 두 시료 사이에서 뚜렷한 차이를 확인할 수 없었다. 반면에 케익비저항의 경우에는 자연입자에 의해 형성된 플록이 상대적으로 큰 케익비저항값을 나타내었다. 이는 자연입자에 의해 형성된 플록이 인공입자에 의한 것 보다 막오염을 더 심하게 일으킨다는 사실을 입증하는 결과이다.

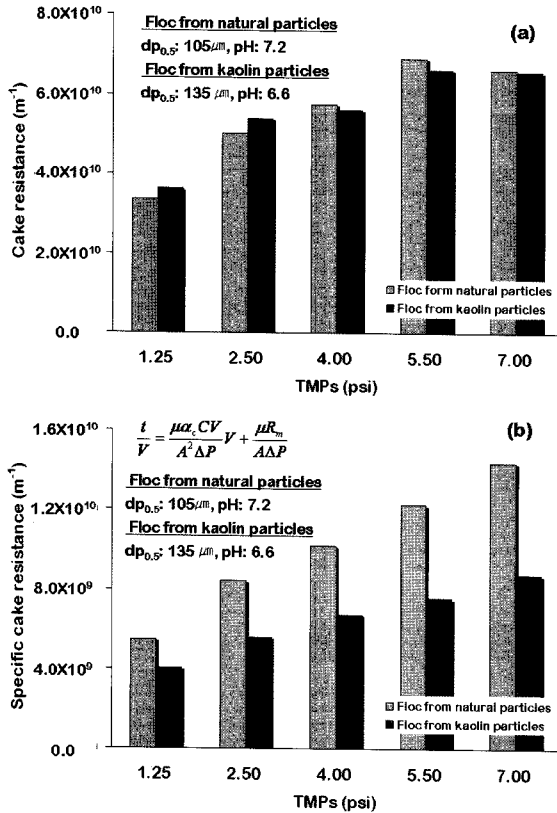


Fig. 4. Cake resistances (a) and specific cake resistance (b) with increasing TMPs at the optimized floc formation condition.

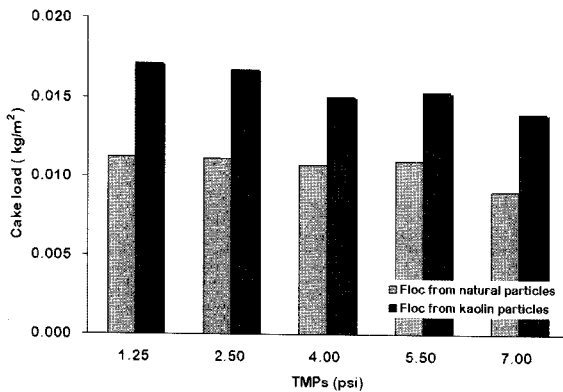


Fig. 5. Cake loads with increasing TMPs at the optimized floc formation condition.

케익부하(m')와 케익비저항(α_c)이 모두 케익저항(R_c)의 함수로 작용하지만 막오염 현상은 케익비저항값과 상관성이 크다는 것을 알 수 있었다.

더욱이 Fig. 5에 제시된 막간차압 하에서 케익부하에 대한 결과를 보면, 인공입자에 의해 형성된 플록이 평균 $5.02 \pm 0.0007 \text{ g/m}^2$ 로 자연입자보다 높은 케익부하를 보였다. 이는 kaolin 입자의 밀도가 자연입자 보다 높아 나타난 현상으로 파악된다. 따라서 케익에 의한 막오염은 막표면에 축적된 케익의 질량 보다는 그것의 구조적 특성이 더 큰 영향을 발휘한다는 사실을 추론할 수 있었다.

3.4. 플록 특성

3.4.1. 응집플록 크기분포

막분리에 적용된 두 시료는 응집처리에 의하여 수중의 오염물질들이 플록으로 전환되어 있는 상태라는 점을 감안 할 때, 막오염에 영향을 미치는 인자들이 대부분 응집플록이라고 판단할 수 있다. 하지만 Fig. 3에 나타난 바와 같이 동일한 조건에서 응집처리 한 플록이라 할지라도 서로 상이한 막오염 현상을 보이고 있다. 따라서 응집플록을 함유한 채로 분리막 공정을 적용할 경우에는 응집플록에 대한 특성분석과 막오염 간의 상관성을 면밀히 파악할 필요성이 있다.

우선, 응집플록의 핵이 되는 원수 입자의 크기분포를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 제시한다.

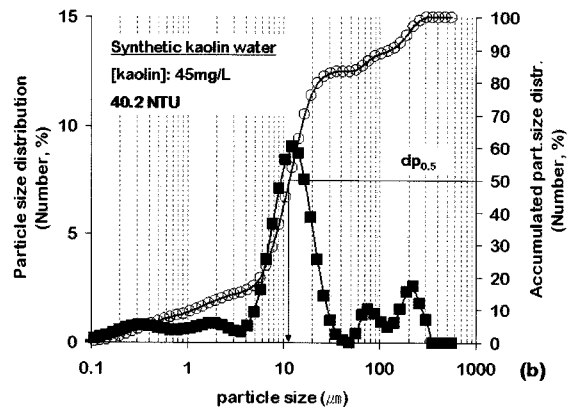
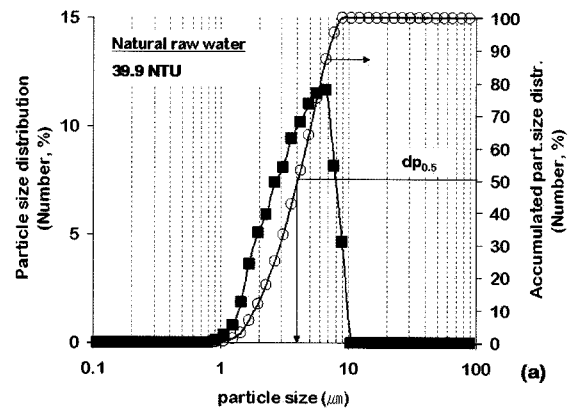


Fig. 6. Distributions of particle size and accumulated particle size of natural particles (a) and kaolin particles (b).

자연원수의 경우 입자크기가 대체로 1~10 μm 범위에 분포하며, 측정된 입자크기분포의 비율이 50%(dp_{0.5}) 및 90%(dp_{0.9})에 이를 때 각각 4.02 μm, 6.94 μm로 나타났다. 인공원수의 경우 자연원수에 비하여 대체로 0.1~30 μm 범위에 분포하며, 약 100 μm 이상의 입자도 어느 정도 존재함을 보였다. 인공원수의 경우 측정된 입자크기분포의 비율이 50%(dp_{0.5}) 및 90%(dp_{0.9})에 이를 때 각각 11.45 μm, 128.0 μm로 나타났다.

이미지 분석에 의하여 계산된 플록의 크기(major axis)를 바탕으로 하여 자연입자 및 인공입자로 형성된 플록의 크기분포도를 Fig. 7에 제시한다.

두 시료 모두 대체로 10~1000 μm의 범위에 분포 되었으며, 자연입자에 의해 형성된 플록의 경우 측정된 입자크기 분포의 비율이 50%(dp_{0.5})에 이를 때 대략 103.1 μm를 나타내었다. 반면에 인공입자에 의해 형성된 플록의 경우 측정된 입자크기분포의 비율이 50%(dp_{0.5})에 이를 때 대략 139.0 μm를 보임으로서, 자연입자에 의해 형성된 플록에 비하여 다소 큰 결과를 나타내었다.

Fig. 6과 Fig. 7에 제시한 결과로 보면 인공입자의 dp_{0.5}가 자연입자 보다 약 2.8배 크다는 점과 인공입자에 의해 형성된 플록의 dp_{0.5}가 자연입자에 의해 형성된 플록 보다 1.3배 크다는 것을 함께 고려했을 때 응집의 핵으로 작용하는 원핵 입자 크기 분포도의 상이함이 응집플록 크기 분포에 어느 정도 영향을 미치거나, 반영될 수 있다는 사실을 확인하였다.

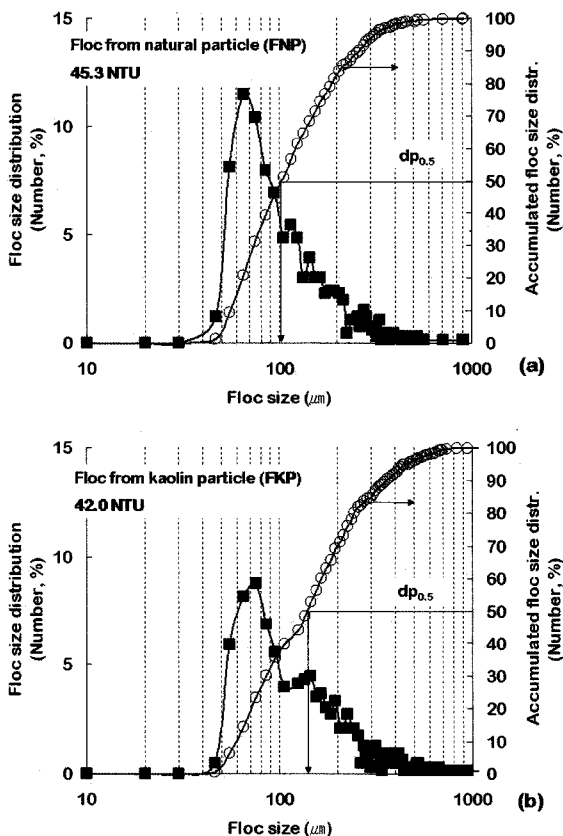


Fig. 7. Distributions of floc size and accumulated size floc from natural particles (a) and kaolin particles (b).

3.4.2. 프랙탈 차원 분석

자연입자 및 인공입자에 의해 형성된 플록의 특성을 파악하기 위해 프랙탈 차원 분석을 수행하였다. 플록의 이미지 촬영을 활용한 프랙탈 차원 분석은 각각의 플록에 대한 직접적인 평가가 어느 정도 가능하다. 본 연구에서 활용된 프랙탈 차원은 플록의 투영면적(projected area)과 가장 긴축(major axis)의 상관성을 가지고 분석된 2차원의 프랙탈 차원(D₂)을 구하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 제시한다.

자연입자플록과 카올린입자플록의 2차원 프랙탈 차원은 각각 1.79 및 1.84로서 카올린입자플록의 경우가 더 크게 분석되었다. 프랙탈 차원의 일반적 해석에 따르면, 어떠한 플록의 핵이 되는 입자가 플록 내에 밀도가 질게 충전 되어있을 경우, 무정형의 느슨하고 길쭉한 형태의 플록보다 높은 프랙탈 차원을 가진다고 하였다.^{5,7,11} 따라서 자연입자플록의 경우 카올린입자플록에 비하여 다공성의 플록으로 구성되어 있어 다소 쉽게 압축 또는 압밀 될 가능성이 크다는 것을 추론 할 수 있다.

3.4.3. 케익층 압축능

이미 언급했던 바와 같이 본 연구에서 분리막 여과에 사용된 실험원수는 응집처리에 의하여 수중에 존재하는 대부분의 오염물질들이 플록으로 전환된 상태이다. 즉 다시말해서 분리막 표면에 형성되는 케익층은 거의 플록에 의한 것으로 볼

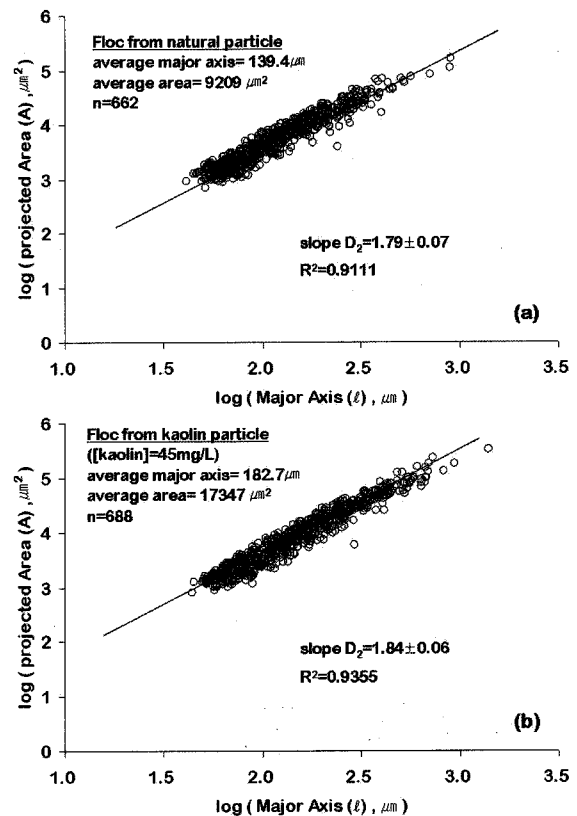


Fig. 8. Determination of area-based 프랙탈 dimensions for flocs from nature particles (a) and flocs from kaolin particles (b).

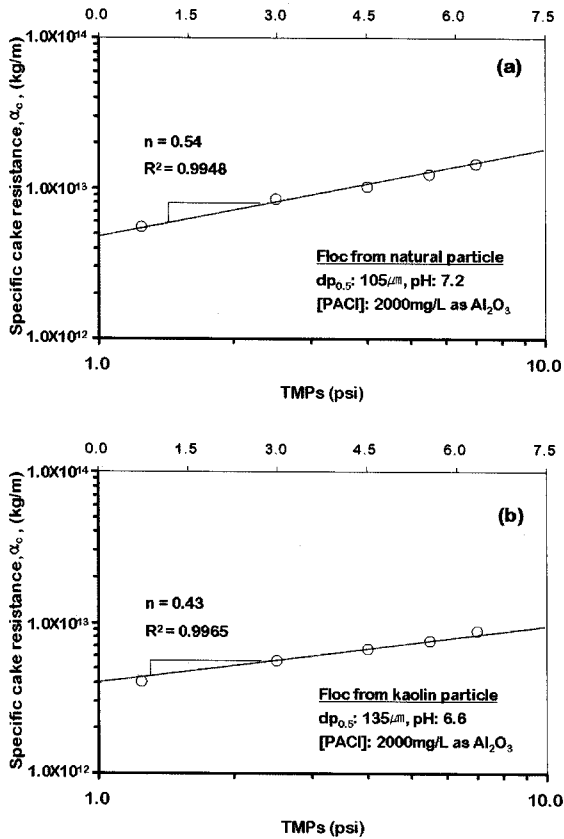


Fig. 9. Average specific cake resistance over a range of TMPs with flocs from natural particles (a) and from kaolin particles (b)

수 있다. 따라서 케익층 압축능력의 정도를 평가한다는 것은 간접적으로 플록의 특성 파악을 할 수 있다고 사료된다. 분리막 표면에 축적된 케익층의 압축능 평가 결과를 Fig. 9에 제시하였다.

자연입자플록 및 카올린입자플록으로 축적된 케익층의 압축능은 각각 0.54 및 0.43으로 나타났다. 즉, 카올린입자플록으로 축적된 케익층에 비하여 자연입자플록으로 축적된 케익층의 압축 가능한 정도가 크므로, 압력이 가해졌을 때 좀 더 조밀한 층을 형성할 수 있었던 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 응집플록의 어떤 특징이 막오염에 가장 큰 영향을 미치는지를 고찰하고자 자연입자와 인공입자에 의해 형성된 플록을 비교·관찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 막투과유속저감에 관한 결과에서 초기 막투과유속의 50%가 감소되는 동안 자연입자에 의해 형성된 플록함유수는 약 333 mL, 인공입자에 의해 형성된 플록함유수는 약 740 mL의 투과량을 보였으며, 케익비저항의 경우에는 자연입자에 의해 형성된 플록함유수가 약 1.7배 높은 값을 보였다. 따

라서 자연입자에 의해 형성된 플록함유수가 분리막 오염을 더 심하게 일으킨다는 사실을 확인 하였다.

2) 자연입자플록은 카올린입자플록보다 더 큰 케익비저항 값을 보임으로서, 케익층 형성 시 다른 양상의 케익층구조를 가질 수 있음을 확인하였다. 또한, 케익층 내에서 수류의 이동이 억제되어 막오염에 부정적인 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

3) 자연원수와 인공원수 입자크기분포 중에서 $dp_{0.5}$ 가 각각 $4.02 \mu\text{m}$, $11.45 \mu\text{m}$ 로 분석되었다. 또한 응집처리 후 자연입자플록과 카올린입자플록의 $dp_{0.5}$ 는 각각 약 $105 \mu\text{m}$, $135 \mu\text{m}$ 로 분석됨으로서, primary particle size distribution의 상이함이 응집플록의 크기에 영향을 줄 수 있다고 판단된다. 상대적으로 작은 크기의 플록이 막표면에 축적되어 케익층을 형성하게 되면 케익층 내의 공극이 협소해 짐으로서 막오염이 증폭될 수 있다고 판단된다.

4) 자연입자플록과 카올린입자플록의 압축능과 프랙탈 분석 결과 각각 0.54, 0.43 및 1.79, 1.83의 수치를 나타내었다. 이것은 자연입자플록이 카올린입자플록보다 좀 더 쉽게 압축 또는 압밀 될 가능성을 시사하며, 분리막 표면에 케익층을 형성 할 때에는 상대적으로 높은 저항을 발휘할 수 있음을 의미한다.

사 사

본 논문은 한국학술진흥재단의 신진교수 연구지원(과제번호: D00165)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Susanto, H. and Ulbricht, M., "Influence of ultrafiltration membrane characteristics on adsorptive fouling with dextrans," *J. Memb. Sci.*, **266**(1-2), 132~142(2005).
2. Lee, N., Amy, G., Croué, J. P., and Buisson, H., "Morphological analyses of natural organic matter(NOM) fouling of low-pressure membranes(MF/UF)," *J. Memb. Sci.*, **261**(1-2), 7~16(2005).
3. 이석현, 권지향, 최양훈, 안규홍, "전처리로 응집공정을 이용한 정밀여과 공정에서 응집 플록 특성에 따른 막오염 연구," 대한상하수도학회지, **18**(6), 785~793(2004).
4. Li, D. H. and Ganczarczyk, J., "Fractal geometry of particle aggregates generated in water and wastewater treatment processes," *Environ. Sci. Technol.*, **23**(11), 1385~1389(1989).
5. Chakraborti, R. K., Atkinson, J. F., and Van Benschoten, J. E., "Characterization of alum floc by image analysis," *Environ. Sci. Technol.*, **34**(18), 3969~3976(2000).
6. Stone, M. and Krishnappan, B. G., "Floc morphology and size distribution of cohesive sediment in steady-state flow,"

- Water Res.*, **37**(11), 2739~2747(2003).
7. Rahmani, N. H. G., Dabros, T., and Masliyah, J. H., "Fractal structure of asphaltene aggregates," *J. Coll. Interf. Sci.*, **28**(2), 599~608(2005).
 8. Guan, J., Waite, T. D., and Amal, R., "Rapid structure characterization of bacterial aggregates," *Environ. Sci. Technol.*, **32**(23), 3735~3742(1998).
 9. Cheryan, M., *Ultrafiltration Handbook*, Technomic Publishing Company, Pennsylvania, pp. 172(1986).
 10. Lee, S. A., Fane, A. G., and Waite, D. T., "Impact of natural organic matter on floc size and structure effects in membrane filtration," *Environ. Sci. Technol.*, **35**(17), 6477~6486(2005).
 11. Logan, B. E. and Klips, J. R., "Fractal dimensions of aggregates formed in different fluid mechanical environments," *Water Res.*, **29**(2), 443~453(1994).