

論 文

슬러지의 脱水性에 대한 濃度의 影響과 케이크 閉塞現象의 解析

Effect of sludge concentration on sludge dewaterability and cake clogging analysis

權 載 玄 · 朴 仲 鉉*

Kwon, Jae Hyun, Park, Chung Hyun*

Abstract

Although the specific resistance to filtration is the most frequently employed means for characterizing dewaterability of a sludge, it presently is not possible to design nor to predict performance of dewatering facilities using traditional linearized parabolic filtration equation, that is, the specific resistance model because of theoretical and practical inadequacies of the concept. Limitations of the specific resistance model reflect the need to examine fundamental sludge properties and filtration behaviors affecting dewaterability. From this study, two major limitations of the specific resistance model were noted. First, specific resistance values are very dependent on the sludge concentration because of the variations of particle size distribution and cake clogging to occur when surface area mean diameter is less than $25\mu\text{m}$ for activated sludge, $18\mu\text{m}$ for water treatment plant sludge. Second, nonparabolic filtration behavior can result from cake clogging, caused by the migration of fine particles into the cake pores, accelerated by skin effect with highly compressible sludges.

1. 序 論

현재 脱水施設의 선정, 설계 및 운전은 탈수 효율에 영향을 미치는 슬러지의 기본 특성을 고려하지 않은 경험적이고 인률적인 방법에 의존하고 있어 경제적 손실을 초래하고 있다. 이는 탈수공정의 이론과 실제간의 괴리에서 발생하는 문제로서 종래의 여파 이론에 근거한 실

험실 차원의 연구 결과들이 實規模 탈수시설의 설계와 수행능력 예측에 많은 편차를 낳았기 때문이다.

압축성 슬러지의 탈수 효율을 향상시키기 위해서는 탈수 속도의 증가, 케이크 吸水率의 저감이라는 두가지 과제에 접하게 되는데, 슬러지의 탈수 속도를 특성화하는데 가장 일반적으로 이용되는 방법이 시간에 따른 濾液量의 변화를 측정하여 계산하는 平均比抵抗이다. 그러나 이 개념은 슬러지의 고형물 농도^{1~3)}, 입자 이동에 의한 케이크 및 濾材 閉塞^{4~8)}의 영향을 반영하지 않고 있다는 한계성을 갖고 있

仁濟大學校 環境學科 專任講師.

*서울大學校 都市工學科 教授.

슬러지의 탈수성을 특성화하는데 있어 많은 오차를 유발하고 있다.

슬러지의 농도 변화에 따른 탈수성의 변화는 종래의 비지항 모형에서 이론적으로 예측할 수가 없으나, 다수의 연구 결과에 의하면 슬러지 농도에 따라 평균비저항이 분명히 변화한다. 현재까지 보고된 슬러지 농도가 평균비저항에 영향을 미치는 원인으로, 搾出作用(squeezing action)에 의한 케이크내 유속 변화^{9), 10)}, 케이크 充填密度의 변화^{1~3)}, 케이크 형성 시간의 차이³⁾, 케이크 閉塞(cake clogging)^{5), 6)} 등을 들 수 있다. 특히 미세입자의 이동에 의한 케이크의 폐색현상이 비포문신 여과 거동의 주요 원인으로 보고된 바가 있는데^{4~8), 20~22)}, 이와 같은 여과 거동은 평균비저항을 여과시간에 따라 변화시킴으로 종래의 선형화된 포물신 여과방정식을 폐색현상이 발생하는 슬러지에 적용하기에는 타당하지 않다. Svarovsky³⁾는 슬러지의 농축에 의한 농도 증가의 효과를 고형물 수량(solids yield) 증가, 케이크 평균비저항의 감소, 濾液의 청진화, 폐색성의 감소로 기술하였다. 그러나 이상의 연구 결과는 카울린이나 수산화 알루미늄을 대상으로 한 것으로 정수장이나 하수처리장에서 배출된 슬러지를 실증자료로 한 연구 결과는 거의 보고된 바가 없다.

따라서 탈수시설의 합리적 선택과 적절한 설계 및 효율적인 운전을 위해서는 합리적이고 확고한 여과이론의 개발이 요구되며, 이를 위해서는 슬러지의 주요 특성에 기초한 여과 기동의 깊은 이해가 선결되어야 하겠다. 본 연구는 浸出水 처리장에서 배출되는 活性슬러지와 淨水場 슬러지를 대상으로 종래의 여과방정식에서 도출된 비저항 모형의 한계성인 슬러지 농도와 케이크 閉塞(cake clogging)의 영향을 粒度分布라는 슬러지의 주요 특성과 관련시켜 해석하였다.

2. 實驗材料 및 方法

본 연구에서 사용한 실험재료는 김해시 쓰레기 매립지의 침출수 처리장에서 채취한 활성슬

러지(activated sludge)와 부산시 명장 정수장에서 채취한 저류조 슬러지이다.

김해시 쓰레기 매립장의 매립면적은 28,584m³로서 92년 말에 완공하여 97년까지 사용할 계획으로 되어 있고¹¹⁾, 매립방법은 준 힘기성 위생매립방식으로 遷水膜과 浸出水 처리시설을 갖추고 있다. 침출수는 지하수와 회석(1~2.5배)하여 1차 응집침전조(황산반토, 가성소오다, 고분자응집제 사용)로 유입되어 생물학적 공정인 상기 폭기방식에 의한 완전 혼합형 활성슬러지법과 회전워워법에 의해 2, 3차 처리 후 방류하고 있다.

본 연구가 수행되는 동안 침출수 차관량은 평균 45m³/일이며 침출수 수질은 COD_{Mn}가 평균 2,700mg/L, BOD는 평균 710mg/L로서 침출수내 難分解性 有機物이 많은 것으로 추정되며 pH는 8.1, SS는 평균 190mg/L, Cl⁻는 평균 3,500mg/L, 알카리도는 평균 5,300mg/L, 경도는 평균 1,000mg/L, PO₄³⁻과 NH₄⁺가 각각 평균 5.30mg/L, 2,600mg/L였다. 활성슬러지 공정의 유입수 수질은 pH가 평균 7.4, BOD는 평균 280mg/L, 유출수는 BOD가 평균 32mg/L로 약 88%의 제거율을 보였으며, COD_{Mn}은 평균 490mg/L에서 평균 310mg/L로 감소하여 약 36%의 낮은 제거율을 보였다. NH₄⁺도 曝氣槽를 통해 2,300mg/L에서 2,200mg/L의 변화만을 보여 거의 제거되지 않았다. 시료를 채취한 활성슬러지 공정의 운전 조건은 표 1과 같다. 본 연구의 실험재료중 하나인 정수장 슬러지(water treatment plant sludge)를 채취한 부산시 명장 정수장의 정수 생산량은 약 230,000m³/day, 슬러지 발생량은

표 1. 활성슬러지 공정의 운전조건

Parameters	Range
HRT(hr)	16 ~ 27
MLSS(mg/L)	1,556 ~ 2,640
F/M(gBOD/gMLSS-day)	0.01 ~ 0.10
Temperature(°C)	21 ~ 24
SVI(mL/g)	89 ~ 118

表 2. 슬러지의 특성*

Item	Water Treatment Plant Sludge	Activated Sludge (Leachate Treatment Plant)
$\rho_s(\text{kg/m}^3)$	2,114	1,809
pH	6.72	6.47
VS/TS	0.37	
$d_{sa}(\mu\text{m})$	17.10	19.32
$S_o(\text{m}^2/\text{cm}^3)$	0.45	0.38
Al(mg/kgTS)	72,000	
Mn(mg/kgTS)	30,000	
Fe(mg/kgTS)	19,900	

*Average value

약 $20\text{ m}^3/\text{day}$ 이며 유입 원수의 탁도는 $8\sim 15\text{ ppm}$, SS는 $4\sim 6\text{ ppm}$ 이다.

이상의 조건에서 채취한 슬러지의 특성은 표 2와 같다. 여기서 고형물 입자의 表面積 平均 粒徑(surface area mean diameter), d_{sa} 와 比表面積(specific surface area), S_o 는 슬러지 농도 s 의 범위 $0.005\sim 0.017$ (활성슬러지), $0.004\sim 0.02$ (정수장 슬러지)에서 측정된 값의 평균이다. 채취한 모든 슬러지는 눈의 크기가 1 mm (18번)인 체로 걸러 실험전에 挾雜物을 제거하였다.

이상의 침출수 수질 특성, 폭기조 운전 조건 및 슬러지 특성에 관한 실험은 standard methods^[2], 公定試驗方法^[3]에 준하여 행하였는데 Cl⁻는 Argentometric method, 경도는 EDTA titrimetric method, NH₄⁺는 Phenate method, PO₄³⁻는 Stannous chloride method를 사용하였다. 또한 고형물 입자 밀도, ρ_s 는 50ml 비중병(pycnometer)을 사용하여 측정하였고, 고형물 입자의 표면적 평균입경과 비표면적은 레이저 회折分光器(Malvern Master Sizer E)를 사용하여 측정하였으며, Al, Fe, Mn은 原子吸光光度計(Varian Spectro AA-20)로 분석하는데 Al의 경우, N₂O⁻아세틸렌 가스와 고온버너를 사용하였다.

슬러지의 농도 및 양이온계 고분자 응집제(FO-4550SH, 유니코(주))의 注入量 변화에 따라 케이크의 평균미저항을 측정하기 위해 그

림 1과 같은 부코너 판넬 실험 장치를 사용하였으며, 시료양은 $25\sim 50\text{ mL}$ 로 하였고 濾紙는 Whatman #1로서 空隙의 크기는 $11\mu\text{m}$ 이다. 여액의 점성을 동일한 온도의 물의 점성으로 간주하였으며 주기적으로 점도계(Brookfield, DV-1+)에 의해 확인하였다. 슬러지의 농도 변화에 따른 평균미저항의 측정은 67kPa 의 압력 차에서 행하였고 채취한 슬러지를 약 1시간 정도 침강시킨 후 上澄液을 사용하여 농도를 변화시켰다. 분말상의 고분자 응집제를 1 g/L 의 용액으로 만들어 원하는 양을 슬러지에 주입하였는데 Jar-test 장치를 이용하여 급속교반(200 rpm , 1분)과 완속교반(30 rpm , 5분)을 연속적으로 실행한 후 탈수를 행하였다.

그리고 각 농도와 응집제가 주입된 조건에서 슬러지의 입도분포를 측정하기 위해 레이저 회折分光器(Malvern Master Sizer E)를 사용하였는데, 이는 投影 圓相當徑 측정방식을 따르며 측정범위는 $0.1\sim 600\mu\text{m}$ 로서 부피 기준의 입도분포를 나타낸다. 시료를 균일하게 유지하면서도 풀력의 파괴를 가능한 방지하기 위해 초음파는 사용하지 않았고 교반강도도 약하게 유지하였으며 모든 시료에 동일한 펌핑과 교반조건을 부여하였다.

일정한 압력차(67kPa)에서 탈수를 통해 형성된 케이크를 제거한 후 동일한 압력차에서 증류수 300 ml 이 여지(Whatman #1)를 통과하는 데 걸리는 시간을 측정하였고 Darcy식에 의

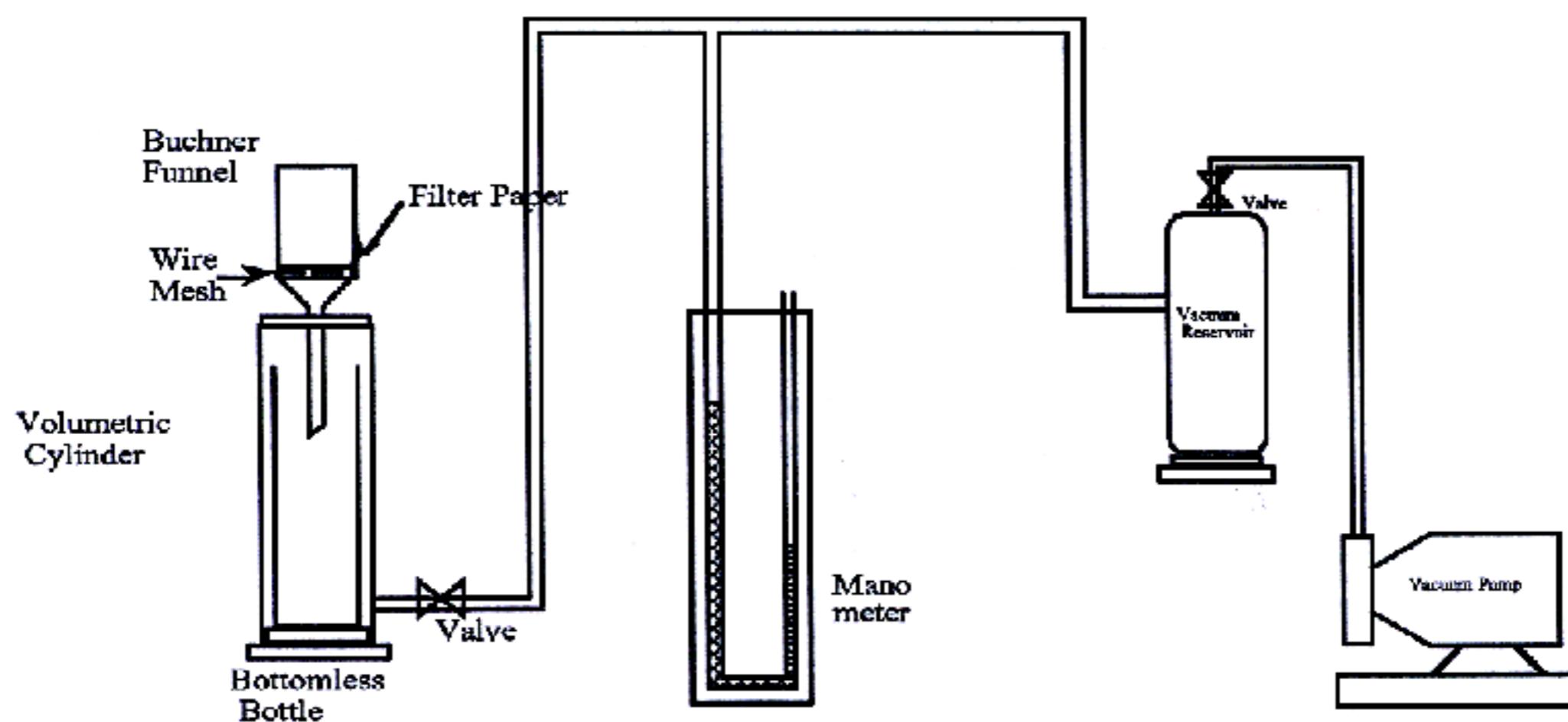


그림 1. 부크너 관별 실험 장치

해 여재저항을 계산하였다. 그리고 슬러지의 부피를 변화시키면 케이크 형성량도 변화하는 데 동일한 방법으로 각각의 여재저항을 측정하여 케이크의 고형물 질량에 따른 濾材抵抗의 변화를 조사하였다.

3. 實驗 結果 및 考察

3.1 슬러지 濃度의 影響

슬러지의 탈수성 해석에 일반적으로 이용되는 비저항 모형으로는 슬러지 고형물 농도의 영향을 예측할 수 없다. 그러나 슬러지의 초기 농도 변화에 따른 케이크 평균비저항의 변화를 보여준 그림 2에서 알 수 있듯이 슬러지 농도의 증가에 따라 평균비저항이 크게 감소하였다.

정수장 슬러지에 비해 높은 평균비저항을 보인 침출수 처리장의 활성슬러지는 농도 s 가 0.0051에서 0.0064정도의 작은 변화에도 불구하고 평균비저항이 약 $63 \times 10^{12} \text{m/kg}$ 에서 $30 \times 10^{12} \text{m/kg}$ 으로 1/2이상 감소하여 저농도 구간에서 큰 변화율을 보인 반면 0.0064이상의 농도 구간에서는 변화율이 급속히 작아져 그 변화 양상을 적절한 함수로 표현하기가 어려웠다. 그러나 정수장 슬러지의 농도에 따른 평균비저항의 기동은 다음과 같은 머함수($r^2 = 0.85$)로 표현이 가능하였다.

$$\alpha_{av} = 1.0 \times 10^{12} s^{-0.54} \quad (1)$$

이와 같은 변화 양상은 카올린과 수산화 알루미늄 슬러지를 대상으로 한 연구 결과로 보고된 바가 있는데^{1), 3), 14)}, Christensen과 Dick¹⁴⁾에 의하면 수산화 알루미늄 슬러지의 경우에 슬러지의 고형물 농도 s 를 0.035까지 증가시키면서 평균비저항을 측정한 결과 $s < 0.005$ 에서 농도가 증가함에 따라 비저항값이 급속히 감소하였고 $s > 0.005$ 에서는 거의 일정하여 본 연구의 활성슬러지와 유사한 변화 형태를 보였다. Svarovsky³⁾는 수산화 알루미늄의 탈수 실험을 통해 평균비저항과 슬러지 농도의 관계를 s 의 지수가 -0.8031인 머함수로

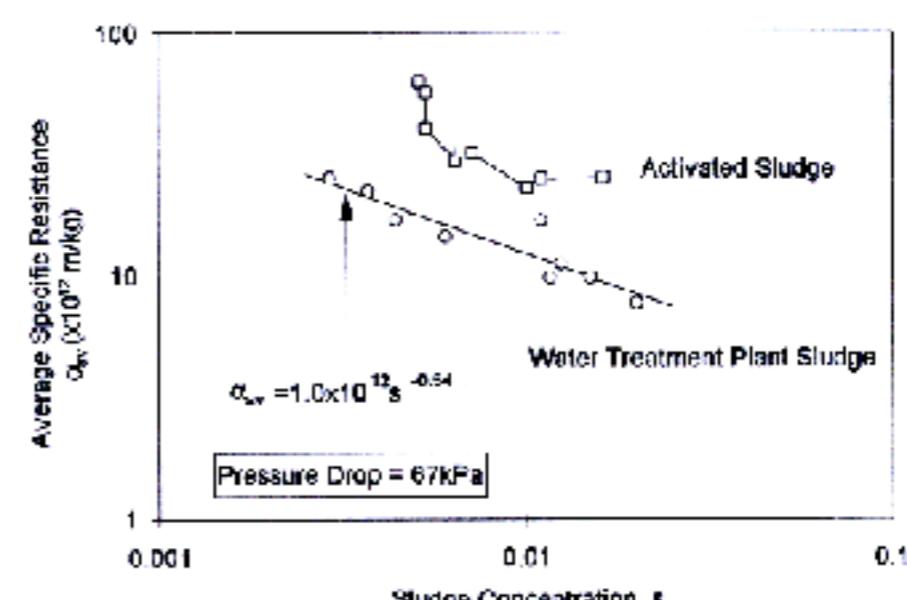


그림 2. 슬러지 농도에 따른 평균비저항의 변화

표현한 바 있어 본 연구의 정수장 슬러지와 유사한 변화 형태를 보임을 알 수 있다. 그러나 정수장이나 하·폐수 처리장에서 생성된 슬러지를 실험 재료로 한 연구 결과는 거의 보고된 바가 없다.

3.2 粒度分布의 影響

슬러지 농도의 증가에 따라 평균비저항이 감소하는 원인을 밝히기 위해, 슬러지의 일차적 특성 중 동일한 슬러지의 비저항에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 입도분포^{16), 17), 23)}를 측정하여 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

그림 3에 의하면 농도 감소에 따라 미세입자의 양이 증가하고 있으며 이에 상응하여 평균비저항도 증가하였는데, 그 원인이 회석수로 사용된 상징액내의 미세입자에 있음을 알 수 있다. 분포 곡선 B와 C에서 보듯이 극소한粒徑 차이에도 불구하고 평균비저항의 변화가 크게 나타나 미세입자가 슬러지 탈수성에 민감한 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 입도분포의 지표로서 평균입경은 미세입자의 중요성에 기초하여 表面積 平均粒徑, d_{sa} 를 사용하였다. 고분자 응집제를 주입하면 평균입경은 증가하였는데 주입량 증가에 따른 평균비저항의 감소 원인이 입도분포에 있음을 알 수 있다.

그림 5는 슬러지 농도 변화와 고분자 응집제 주입에 따른 표면적 평균입경과 평균비저항을對數그래프상에 함께 나타낸 것으로, 동일한

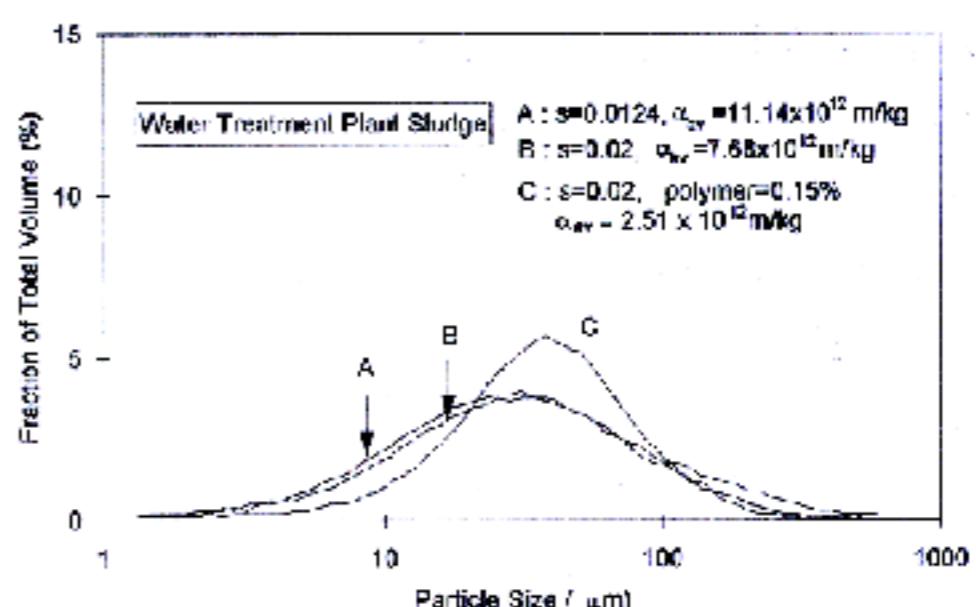


그림 4. 정수장 슬러지의 입도분포

슬러지의 평균비저항의 변화를 하나의 연속 곡선상으로 표현할 수 있어 濃縮 및 polymer 改良에 의한 탈수성 향상의 원인이 표면적 평균입경의 증대에 있음을 알 수 있었다. 그러나 곡선 A와 B를 비교해 보면 동일한 평균입경에서 활성슬러지의 비저항이 높게 나타나 表面積 平均粒徑에 의한 슬러지들간 탈수성의 비교 평가는 타당하지 않았다.

그런데 Kozeny-Carman식, Darcy식 및 비저항과 투수계수의 관계식을 이용하면 비저항은比表面積 S_o 의 제곱에 비례한다.^{3, 18)} 고형물입자의 비표면적 S_o 는 입경에 반비례함으로, 입자의 대표성으로 유체에 대한 표면 저항의 중요성에 입각하여 표면적 입경의 평균값인 d_{sa} 를 사용하면 평균비저항이 표면적 평균입경의 제곱에 반비례함을 알 수 있다. 이것은 Lawler 등¹⁹⁾과 Knocke 등¹⁶⁾에 의해 확인된 바 있는데, Lawler 등은 활성슬러지의 협기성 소화를

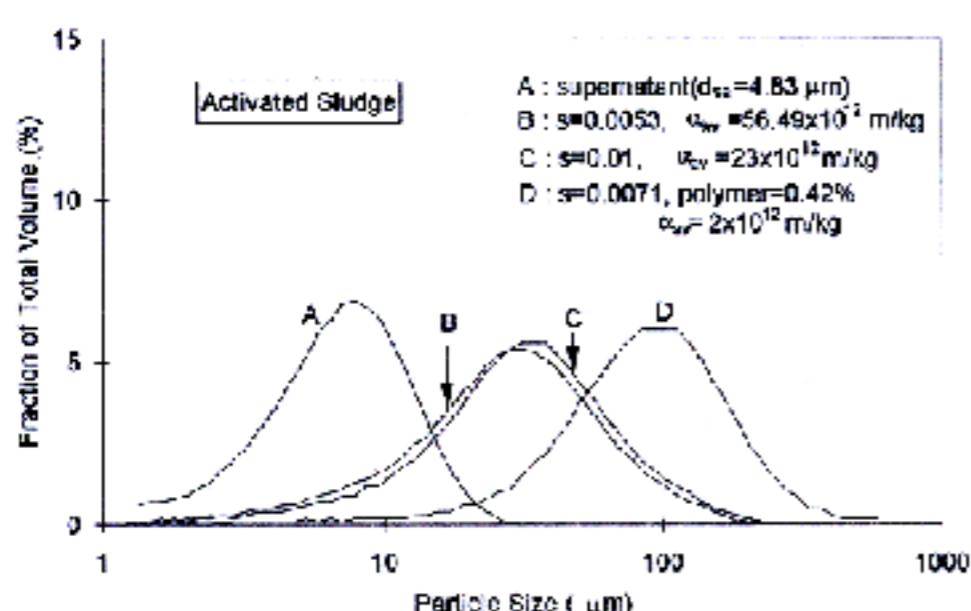


그림 3. 활성슬러지의 입도분포

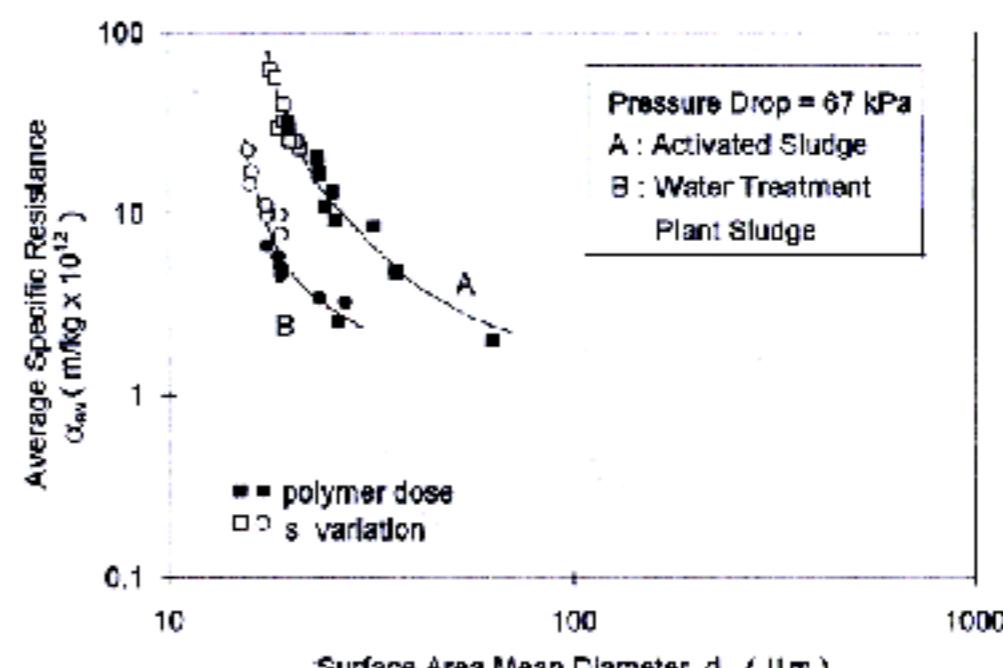


그림 5. 표면적 평균입경과 평균비저항의 관계

통해 입경분포를 변화시키면서 비표면적과 평균비저항의 관계를 대수지상에 나타낸 결과, 기울기가 1.82인 직선 경향을 보였다고 보고하였으며, Knocke 등은 금속 수산화물 슬러지를 대상으로 평균입경 역수값의 세곱과 평균비저항사이에 상관성이 높은 선형관계가 존재함을 밝힌 바 있다. 그러나 Knocke 등에 의하면 비표면적만으로 비저항의 변화를 설명할 수 있었던 이유가 금속 슬러지의 경우에閉塞은 무시해도 될 정도로 중요한 문제가 아니기 때문이다.

본 연구 결과인 그림 5에서는 선형관계를 보이지 않았는데, 이와 같은 현상의 원인은 비표면적외에도 空隙率이 비저항에 영향을 준다는 사실에서 찾을 수 있는데, 미세한 입자가 케이크내 공극을閉塞시켜 공극율을 감소시키며 이로 인해 작은 입경 구간에서 평균입경만으로 설명될 수 없는 높은 비저항값을 보이기 때문으로 생각된다.

따라서 微細粒子의 함량이 높은 슬러지의 평균비저항을 슬러지내 입자의 비표면적이나 평균입경만으로 설명하기에는 충분치 않으며, 슬러지 상호간의 평균비저항도 비표면적이나 평균입경만으로 평가할 수 없어 다른 영향 요인이 존재한다고 판단된다.

3.3 케이크 閉塞에 의한 濾過 構動의 解析

미세입자 구간에서 평균비저항이 급상승하는 현상과 동일한 粒徑을 가지는 두 슬러지간의 평균비저항이 차이를 보인다는 사실의 원인을 밝히기 위해서 농도 변화와 응집제 주입에 따른 여과 거동을 조사하였다. 부크니 판넬 실험에서 측정된 여과시간에 따른 여액량 자료와 케이크 고형물의 질량 분율을 이용해 w_c (= $c v$) 와 $pt/\mu v$ 를 계산하여 그림 6에 나타내었는데, 식 (2)와 같은 저항 형태로 표현된 선형화된

$$\frac{p}{\mu q_{av}} = \frac{\rho t}{\mu v} = \frac{1}{2} \alpha_{av} w_c + R_m \quad (2)$$

抛物線 濾過方程式에 근거하면 그림 6의 그래프는 직선이 되어야 하고 그 직선의 기울기를

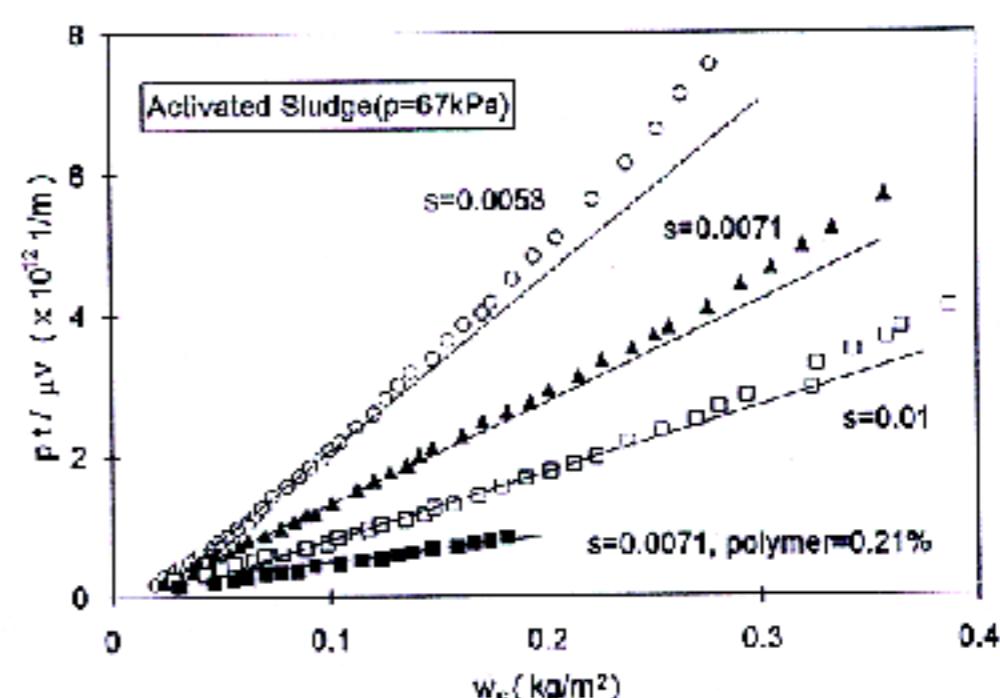


그림 6. 활성슬러지의 농도 변화와 응집제 주입에 따른 여과 거동

2배하여 평균비저항을 구할 수 있다.¹⁸⁾ 이 그래프는 입경이 작은 저농도에서 평균비저항값이 크게 상승하는 활성슬러지의 실험 결과인데, 세가지 모든 농도에서 케이크 형성량 w_c 가 증가할수록, 즉 여과시간의 증가에 따라 $pt/\mu v$ 값이 점점 직선에서 이탈하여 상승하는 여과 거동을 보여 주고 있다. 평균비저항 α_{av} 를 여과 시간에 따라 변화시키는 주요 원인으로 입자 이동에 의한 이재와 케이크의閉塞, 여과중 침전현상의 발생^{14), 15)} 등을 들 수 있는데, 본 시료에서는 여과중에 침전현상이 발생하지 않았음으로¹⁸⁾ 폐색현상을 중심으로 여과 거동을 해석하였다.

미세입자의 이동에 의한 케이크 폐색의 발생 여부는 濾材閉塞에 의해 확인이 가능하며 여과 폐색의 발생 여부는 여과 시간이나 케이크 형성량에 따른 여과지향의 변화를 추정함으로써 그 판단이 가능하다. 이는 여과지향의 측정이 필요함을 의미하고 있는데 압축성이 높고 폐색현상이 존재하는 슬러지의 경우에 여과지향을 w_c 와 $pt/\mu v$ 의 그래프에서 구하는 것은 타당하지 않으므로^{18), 20)} 종류수의 투과실험에서 여과지향을 직접 측정하였다.²⁵⁾

농도 변화에 의한 여과폐색 특성의 변화를 조사하기 위해 여과지향을 측정한 결과를 그림 7에 나타내었다. 고농도로 갈수록 여과의 폐색성은 감소하며 여과지향도 작아졌다. 케이크 형성량이 증가하면서 여과지향의 증가율은 점

점 감소하여 여재저항이 일정한 값으로 수렴하였는데 이는 여과 초기에 여재까지 이동할 수 있었던 微細粒子가 케이크의 형성량이 증가하면서 점점 케이크내에 포착되기 때문이며 결국 케이크 폐색을 발생시킬 것으로 판단된다. 활성슬러지도 농도의 감소에 따라 여재의 폐색성이 증가하였으며 여재저항의 변화 형태도 그림 7과 유사하였으며 응집제의 주입은 여재저항을 크게 감소시켰고 폐색현상도 상당히 줄었다.¹⁸⁾

여재의 폐색현상은 여과중 미세입자의 이동을 의미하고 있어, 이는 케이크도 폐색시켜 여과 시간에 따른 평균비저항의 변화를 초래할 것으로 예상된다. 이를 실증하기 위해 평균비저항을 상수로 취급하지 않고 있는 식 (3)을 변형시켜, 단위면적당 케이크 질량 w_c 의 증가에 따라 케이크 평균비저항 α_{av} 를 계산하였는데, 계산식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{p}{\mu q} = \frac{pdt}{\mu dv} = R_c + R_m = \alpha_{av} w_c + R_m \quad (3)$$

$$\alpha_{av} = \frac{p/\mu q - R_m}{w_c} = \frac{p\Delta t - R_m}{\mu\Delta v} \quad (4)$$

그림 7에서 알 수 있듯이 본 실험에 사용된 濾紙의 저항은 대략 10^{10} m^{-1} 이하인데 비해, 總抵抗은 10^{12} m^{-1} 이상의 높은 값을 나타내고 있다. 따라서 식 (4)에서 총저항 $p/\mu q$ 에 비해 여재저항 R_m 이 아주 작으므로 본 연구에서는

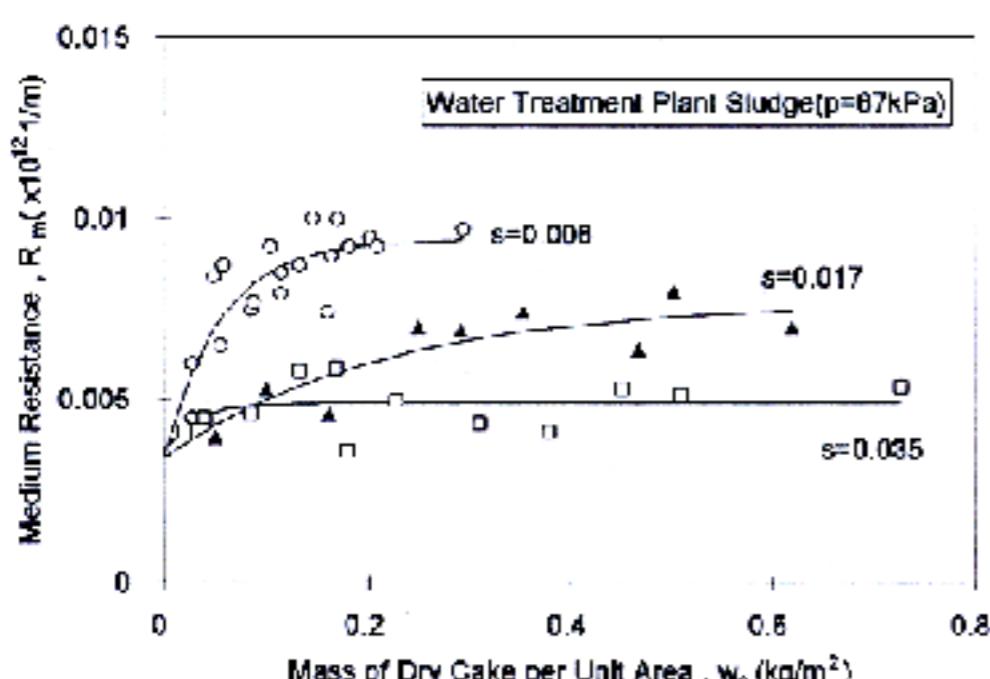


그림 7. 정수장 슬러지의 여재저항에 대한 농도의 영향과 여재폐색

R_m 을 계산에 고려하지 않았다.

그림 8과 그림 9는 앞에서 보인 바 있는 그림 6의 여과실험 결과를 식 (4)에 의해 재해석한 것으로 케이크 형성량의 증가에 따라 평균비저항이 계속 상승하고 있어 종래의 선형화된 포물선 여과방정식이 이과 기동의 해석에 적합하지 않음을 알 수 있다. 또한 평균비저항이 여과 초기에만 변화하는 것이 아니라 여과 전기간에 걸쳐 계속해서 변화하고 있는데, 이 현상의 주 원인은 여과 중반 이후에도 계속 일어나는 입자 이동에 따른 케이크의 閉塞때문으로 판단되며 濾材抵抗이 중반이후 거의 변화가 없다는 사실이 이 판단의 타당성을 뒷받침해 주고 있다. 따라서 그림 6에서 볼 수 있는 저농도 활성슬러지의 非拋物線 濾過 標動은 미세입자의 이동에 의한 케이크 閉塞에서 기인한다고 판단된다.

이와 같은 여과 거동에 대한 케이크 폐색의 영향을 정량화하기 위해 그림 8의 변화 형태를 다음과 같은 역함수로 표현한 결과, 결정계수 (r^2)가 각각 0.89($s = 0.0053$), 0.78($s = 0.0071$), 0.82($s = 0.01$)이어서 식 (5)의 적용이 가능하였다.

$$\alpha_{av} = \alpha_1 w_c^\eta \quad (5)$$

여기서 α_1 은 단위 질량의 乾케이크가 형성될 때의 평균비저항이며 η 는 케이크 閉塞常數로서 $\eta > 0$ 이면 케이크 폐색이 발생하여 여과시간에 따라 평균비저항이 증가하며, 케이크 폐색이 발생하지 않는 압축성 케이크의 경우는 $\eta < 0$ 로서 여과시간에 따라 평균비저항은 감소한다.

위 식과 유사한 형태로 Notebaert 등⁴⁾과 Novak 등⁸⁾이 케이크 폐색을 해석한 바 있다. 여과의 진행은 여액량의 증가, 또는 케이크 乾고형물 질량 w_c 의 증가로 나타낼 수 있는데, 케이크 閉塞은 케이크내 미세 고형물의 이동에서 기인함으로 케이크 乾고형물 질량 w_c 의 증가에 따른 평균비저항의 변화로 폐색현상을 해석하는 것이 더 합리적이라고 생각되며, 이런 측면에서 전술한 여제 폐색도 w_c 의 증가에 따른 濾材抵抗의 변화로 해석하였다.

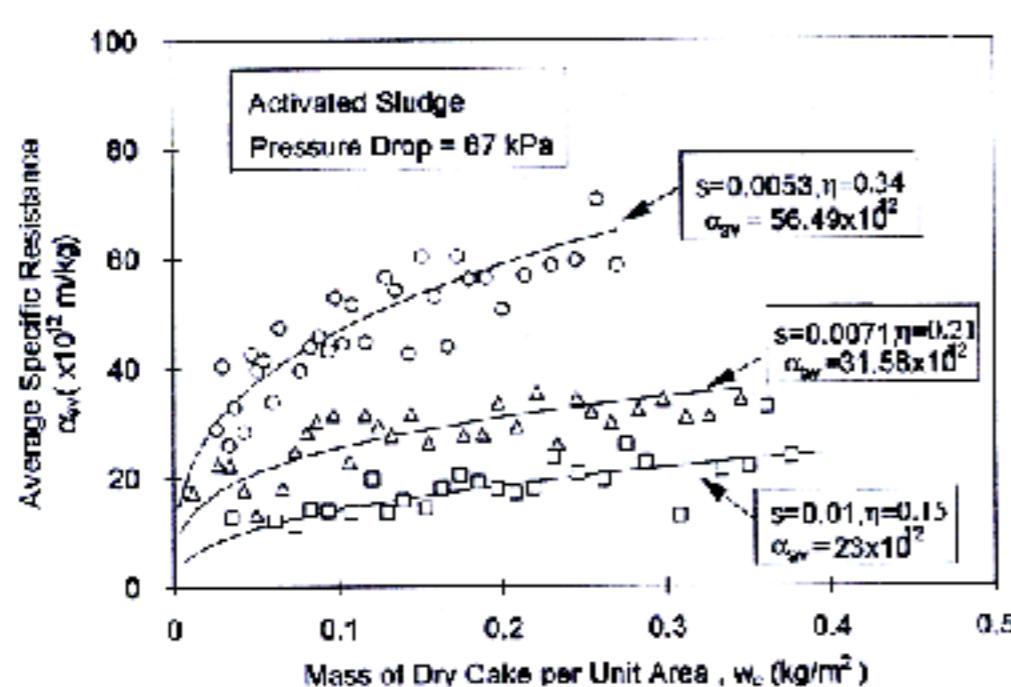


그림 8. 케이크 형성량의 증가에 따른 평균비저항의 변화와 농도의 영향

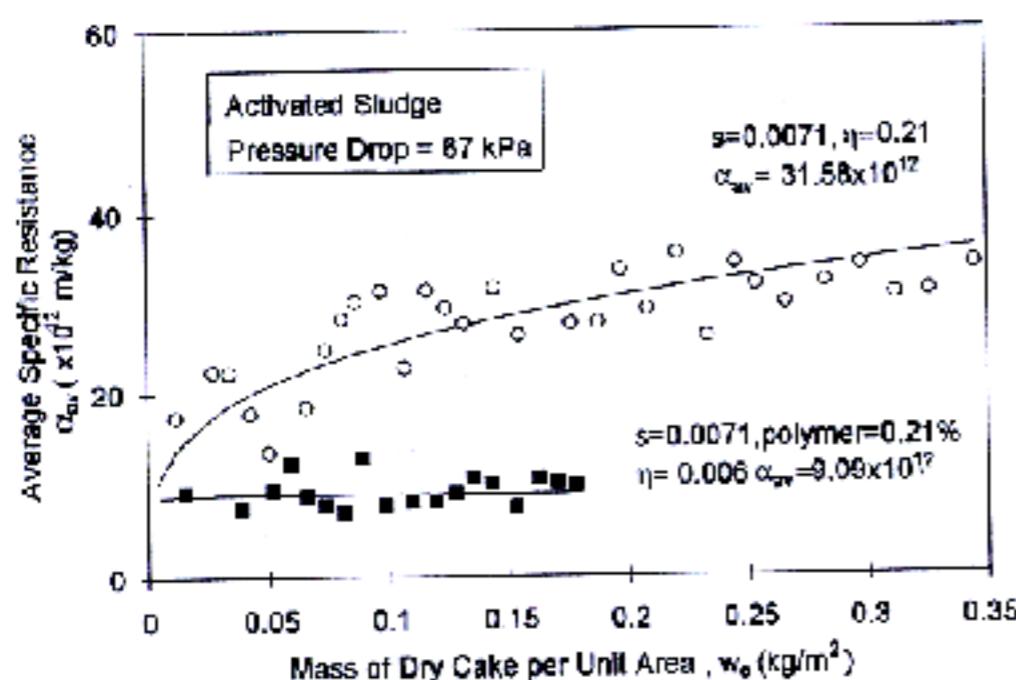


그림 9. 케이크 형성량의 증가에 따른 평균비저항의 변화와 고분자 용집제의 영향

그림 8에 η 값과 평균비저항을 함께 표기하였는데 모두 양의 값을 갖고 있으며 농도가 낮고 평균비저항이 높을수록 큰 값을 보였다. 여기서 평균비저항은 그림 6의 전 구간 자료의 기울기에서 구한 값으로 평균비저항의 변화를 무시한 평균적 개념을 함축하고 있다. 그림 9는 고분자 용집제의 영향을 보여주고 있는데 용집제 주입에 의해 평균비저항과 케이크 폐색상수 η 가 크게 감소하였다.

평균비저항 α_{av} 의 변화를 표현한 식 (5)를 저항형태로 변형된 여과방정식 (3)에 대입하여 적분한 후 로그를 취하면 다음과 같이 선형화된다.

$$\ln\left(\frac{pt}{\mu v}\right) = \ln\frac{a_1}{\eta + 2} + (\eta + 1)\ln w_e \quad (6)$$

여기서 단위여액당 케이크 고형물 질량 $c (= w_e/v)$ 은 정압여과에서 s/s_c 가 약 0.5인 고농도 슬러지의 경우에는 여과시간에 따라 20%만큼이나 변화할 수 있지만, $s/s_c < 0.1$ 인 저농도 슬러지의 경우 c 의 변화는 무시할 정도로 작다.^{22), 24)} 고농도 슬러지의 여과에서 이미 형성된 케이크내의 수분이 배출되는 排出作用에 의해 c 가 감소한다고 판단된다. 본 연구에서는 s/s_c 가 대부분 0.1이하이며 착출작용의 영향을 무시하는 假定常狀態의 조건을 수용할 수 있었기에,¹⁸⁾ c 의 변화는 무시하였다. 또한 전술한 것처럼 총저항에 대한 濾材抵抗의 비율이 아주 작았으므로 여재저항 R_m 도 무시하였다.

결국 여과시간(즉 케이크 형성량)에 따른 평균비저항의 변화 형태와 케이크 폐색상수 η 를 부코너 관NEL 실험을 통해 구할 수 있다.

앞서 보인 바 있는 그림 6의 실험 결과를 식 (6)에 근거하여 해석한 결과, 그림 5의 비선형 관계가 그림 10과 같이 선형화되었으며 기울기와 y 절편값으로부터 여과 시간에 따라 변화하는 평균비저항과 케이크 폐색상수의 추정이 실제로 가능하였다.

농도 s 가 0.0053인 경우 기울기가 1.34인 반면에 s 가 0.01로 증가되면 기울기는 1.15로 감소하였고, s 가 0.0071일 때 1.21이던 기울기가 고분자 용집제의 주입으로 1.006으로 감소하여 농도 증가와 용집제 주입에 의해 케이크의 閉塞性이 감소됨을 알 수 있다.

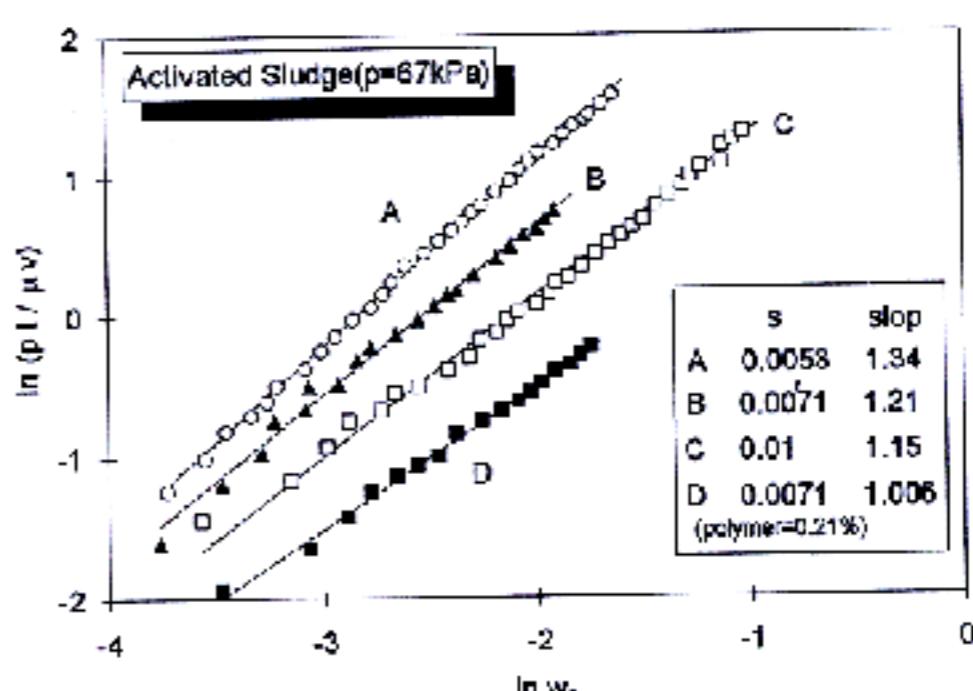


그림 10. 농도 변화와 고분자 용집제 주입에 따른 $\ln w_e$ 와 $\ln(pt/\mu v)$ 의 관계

3.4 케이크 閉塞의 影響

케이크 폐색이 슬러지의 탈수성에 미치는 영향을 조사하고 케이크 폐색을 유발하는 입경의 범위를 찾기 위해 농도 변화와 고분자 응집제의 주입에 따른 표면적 평균입경과 케이크 폐색상수를 함께 그림 11에 나타내었다. Kar와 Keinath⁶⁾는 험기성 소화슬러지에서 케이크 폐색이 발생함을 보였는데, 1~10μm의 미세입자가 폐색을 유발하는 주요 입자로 기술한 바 있으며, Novak 등⁸⁾은 40μm이하의 평균입경을 갖는 활성슬러지에서 케이크 폐색현상이 일어남을 보고한 바 있다.

본 연구 결과인 그림 11에서 보듯이 활성슬러지는 약 25μm 이하의 입경에서 케이크 폐색이 급속히 발생한 반면에 그 이상의 입경에서는 閉塞이 거의 일어나지 않고 있어 약 25μm 이하의 입경에서 입자 크기가 조금만 감소해도 케이크의 폐색현상이 급속히 촉진됨을 알 수 있다. 이에 비해 정수장 슬러지는 약 18μm 이하의 입경에서 케이크 폐색이 발생하여 활성슬러지에 비해 입자가 더 미세해야지만 폐색이 발생함을 알 수 있고, 동일한 입경에서 활성슬러지에 비해 케이크 폐색상수가 작은 값을 보여 두 슬러지간의 평균비저항값의 차이를 입도분포만으로 설명할 수 없었던 이유가 케이크의 폐색성에 차이가 있었기 때문임이 확인되었다. 또한 두가지 슬러지에서 케이크 폐색상수 η 가 -0.08~0.39의 값들을 보이고 있는데, 고분자 응집제의 주입에 의해 表面積 平均粒徑이 크게 되어 케이크의 폐색현상이 소멸됨을 알 수 있다.

케이크 폐색이 평균비저항에 미치는 영향을 밝히기 위해 평균비저항과 케이크 폐색상수의 관계를 그림 12에 나타내었다. 평균비저항의 증가에 따라 η 가 증가하여 약 $8 \times 10^{12} \text{m/kg}$ 이상의 평균비저항에서는 항상 폐색이 일어나고 있다. 특히 종류가 다른 슬러지의 평균비저항도 케이크 閉塞常數만으로 표현이 가능해 η 가 입경 뿐만 아니라 압축성 등과 같은 케이크의 내부 특성까지 합축하고 있는 탈수성의 중요한 영향 인자임을 알 수 있다.

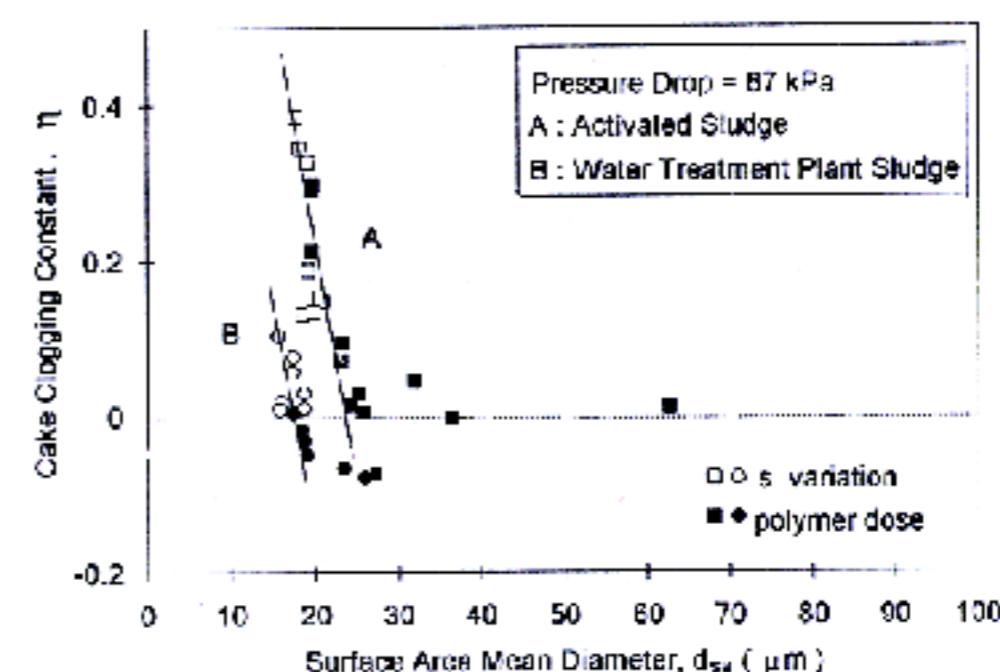


그림 11. 표면적 평균입경 d_{sa} 가 케이크 폐색상수 η 에 미치는 영향

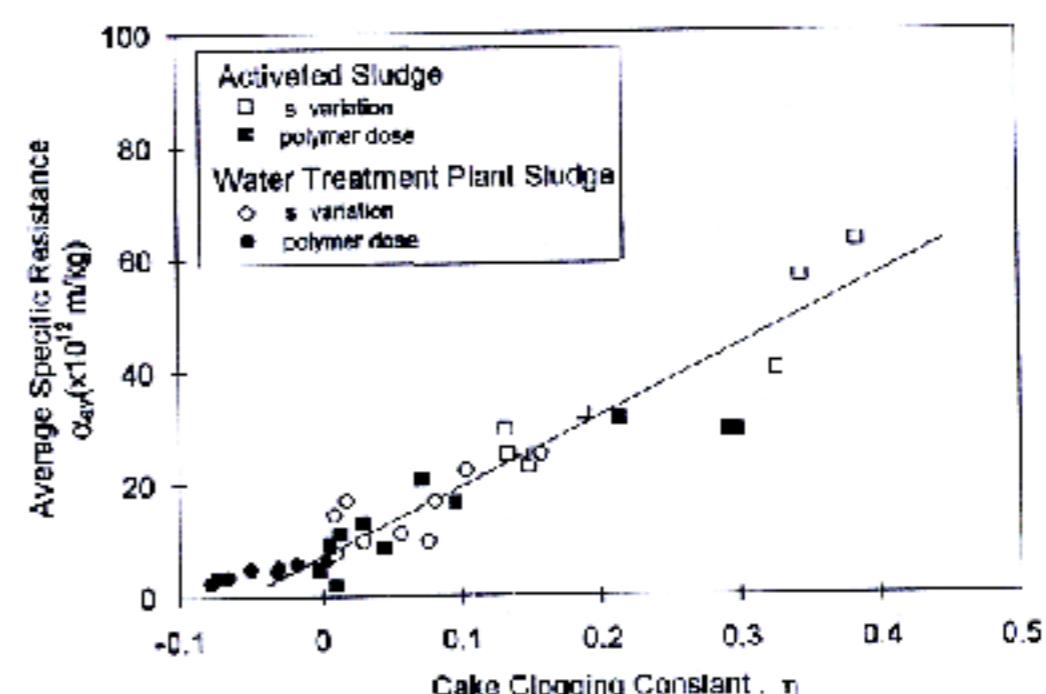


그림 12. 케이크 폐색상수 η 가 평균비저항 c_{av} 에 미치는 영향

따라서 각 슬러지에 있어 표면적 평균입경이 작을수록 평균비저항이 급성승하는 현상과 동일한 입경임에도 불구하고 활성슬러지의 평균비저항이 정수장 슬러지에 비해 큰 값을 나타내는 이유가 미세입자의 이동에 의한 케이크 閉塞에 있음이 판명되었다. 또한 슬러지의 농축과 고분자 응집제 개량에 의한 케이크 평균비저항의 감소 현상을 입도분포와 케이크 폐색특성의 변화로 해석할 수 있었다.

4. 結論

정수장 슬러지와 침출수 처리장에서 발생하는 슬러지를 이용해 슬러지 농도와 입도분포가 탈수성에 미치는 영향을 조사하고 케이크 폐색

현상을 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 케이크의 閉塞現象은 여과진행에 따라 평균비저항을 계속 상승시켜 非拋物線 濾過 擧動을 일으키는 주요 원인임이 판명되었다.

(2) 濾材의 閉塞現象이 밝혀짐으로써 케이크 내 미세입자의 이동을 확인할 수 있었는데, 입자 이동에 의한 폐색은 여과기간중에 계속해서 발생하여 여과 초기에는 주로 濾材를, 그 이후로는 케이크를 주로 폐색시켰다. 또한 슬러지 농도가 낮을수록 여재와 케이크의 폐색성은 증가하였다.

(3) 슬러지내 미세입자의 함량이 높을수록 케이크 폐색은 더욱 촉진되었는데, 환성슬러지가 약 $25\mu\text{m}$ 이하, 정수장 슬러지가 약 $18\mu\text{m}$ 이하의 표면적 평균입경을 갖는 경우에 케이크의 폐색현상은 항상 발생하였다.

(4) 슬러지의 전형적인 농도 범위에서 농도 증가와 고분자 응집제의 주입에 따라 평균비저항이 감소하는 원인이 입도분포의 변화와 케이크 폐색현상의 발생여부에 있었다.

(5) 케이크 폐색상수 η 가 증가함에 따라 평균비저항이 증가하였는데, 종래의 해석방법으로 평균비저항을 구해 본 결과, 약 $8 \times 10^{12}\text{m/kg}$ 이상의 평균비저항에서는 항상 폐색이 발생하였다. 또한 입도분포만으로 비교 평가할 수 없었던 다른 슬러지간의 평균비저항을 케이크 폐색상수만으로는 표현이 가능해 η 가 粒徑 뿐만 아니라, 케이크의 內部 特性까지 합축하고 있는 탈수성의 중요한 영향 인자임이 판명되었다.

(6) 본 연구를 통해 슬러지의 탈수성에 영향을 미치는 주요 인자로 슬러지 농도, 입도분포 및 입자 이동에 의한 폐색현상 등을 도출함과 동시에, 이와 같은 슬러지의 특성중 케이크 閉塞現象에 의한 여과 거동의 변화를 해석하는 방법을 제시함으로써, 상하수 처리장에서 발생하는 슬러지의 탈수성 평가에 적합한 방향으로 종래의 여과이론을 개량할 필요성을 부각시키는 연구 효과를 기대하며, 이를 위한 자료로서 본 연구의 결과를 활용할 수 있다고 판단된다.

記 號

- c 단위 여액당 케이크의 고형물 질량, kg/m^3 .
 d_{su} 表面積 平均粒徑, μm .
 p 총압력, kPa .
 q 全여과면적기준의 단위여과면적당 여액유량 ($= \frac{dv}{dt}$), m/s .
 q_{av} q 의 평균값($= v/t$), m/s .
 R_c 케이크 저항, $1/\text{m}$.
 R_m 여재저항, $1/\text{m}$.
 S_o 고형물 단위체적당 比表面積, m^2/m^3 .
 s 슬러지 고형물의 질량 분율.
 s_c 케이크 고형물의 질량 분율.
 t 여과시간, sec.
 v 단위여과면적당 여액량, m^3/m^2 .
 w 여재로부터 x 만큼 떨어진 지점에서의 단위 면적당 乾케이크 질량, kg/m^2 .
 w_c 단위면적당 乾케이크의 총질량, kg/m^2 .

—Greek—

- α_1 단위 질량의 乾케이크 형성시 平均比抵抗, m/kg .
 α_{av} 케이크 평균비저항, m/kg .
 η 케이크 閉塞常數.
 ρ_s 고형물 밀도, kg/m^3 .
 μ 점도, $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$.

감사의 글

본 논문은 1993년도 재단법인 인체연구장학 재단 연구비 보조에 의하여 연구되었으며 지원에 감사를 표합니다.

参考文獻

- Heertjes P.M., "Filtration", Transactions Institution of Chemical Engineers, 42: T266-T274, 1964.
- Wakeman R.J., "Filtration theory: formation and structure of compressible filter cakes", Mathematical Models and Design Methods in

- Solid-Liquid Separation, ed. by A.Rushton, Martinus-Nijhoff, Boston, 49-82, 1985.
3. Svarovsky L., "Filtration fundamentals", in Solid Liquid Separation, edited by L. Svarovsky, Butterworths, London, 311-337, 1990.
 4. Notebaert F.F, Wilms D.A. and Haute V., "A new deduction with a large application of the specific resistance to filtration of sludges", Water Research, 9: 667-673, 1975.
 5. Karr P.R. and Keinath T.M., "Influence of particle size on sludge dewaterability", JWPCF, 50: 1911-1930, 1978.
 6. Karr P.R. and Keinath T.M., "Limitation of the specific resistance and CST tests for sludge dewatering", Filtration and Separation, 15: 543-544, 1978.
 7. Leu W. and Tiller F.M., "Experimental study of the mechanism of constant pressure cake filtration: clogging of filter media", Separation Science and Technology, 18: 1851-1869, 1983.
 8. Novak J.T., Goodman G.L., Pariroo A. and Huang J., "The blinding of sludges during filtration", JWPCF, 60: 206-214, 1988.
 9. Tiller F.M. and Shirato M., "The role of porosity in filtration VI- new definition of filtration resistance", American Institute Chemical Engineers Journal, 10: 61-67, 1964.
 10. Shirato M., Sambuchi M., Kato H. and Aragaki T., "Internal flow mechanism in filter cakes", American Institute Chemical Engineers Journal, 15: 405-409, 1969.
 11. 金海市, 金海市 쓰레기 埋立場 浸出水 處理場 試運轉 結果 報告書, 1993.
 12. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed., APHA, AWWA and WPCF, 1992.
 13. 公定試驗方法, 水質汚染-廢棄物, 東和技術, 1993.
 14. Christensen G.L. and Dick R.I., "Specific resistance measurements: methods and procedures", Journal of Environmental Engineering, ASCE, 111: 258-271, 1985.
 15. Christensen G.L. and Dick R.I., "Specific resistance measurements: nonparabolic data", Journal of Environmental Engineering, ASCE, 111: 243-257, 1985.
 16. Knocke W.R. and Novak J.T., "Vacuum filtration of metal hydroxides sludges", JEE, ASCE, 106: 363-376, 1980.
 17. Olbörter L. and Vogelpohl A., "Influence of particle size distribution on the dewatering of organic sludges", Water Science and Technology, 28: 149-157, 1993.
 18. 權載炫, 슬러지의 脱水 特性에 대한 壓縮性과 케이크 閉塞의 影響, 博士學位論文, 서울大學校 大學院 土木工學科, 1995.
 19. Lawler D.F., Chung Y.J., Hwang S.J. and Hull B.A., "Anaerobic digestion effects on particle size and dewaterability", JWPCF, 58: 1107-1117, 1986.
 20. Tiller F.M., Chow R., Weber W. and Davies O., "Clogging phenomena in the filtration of liquefied coal", Chemical Engineering Progress, 77: 61-68, 1981.
 21. Tosun I., and Willis M.S., "Energy efficiency in cake filtration", Filtration and Separation, 22: 126-127, 1985.
 22. Risbud H.M., "Cake filtration empirically incorporating particle migration", Filtration and Separation, 18: 20-24, 1981.
 23. Friedrich E., Friedrich H., Heinze W., Jobst K., Richter H., and Hermel W., "Progress in characterization of sludge particles", Water Science and Technology, 28: 145-148, 1993.
 24. Tiller F.M., and Crump J.R., "Recent advances in compressible cake filtration theory", Mathematical Models and Design Methods in Solid-Liquid Separation, ed. by A.Rushton, Martinus-Nijhoff, Boston, 3-24, 1985.
 25. 이재복, 권 일, 박복식, "생물학적 슬러지의 여제거형 모형에 관한 연구", 한국수질보전학회지, 제11권, 제2호, pp.97-108, 1995.