

호기성 소화 슬러지의 케이크 여과특성에 관한 연구

〈상〉



李在福

(경성대 환경공학과 부교수)

〈목 차〉

- 1. 서론
 - 2. 실험재료, 장치 및 방법
 - 2.1 실험재료
 - 2.2 부크너펜셀시험
 - 2.3 압축시험
 - 2.4 침강시험
 - 2.5 시료의 분석
 - 3. 실험결과 및 분석
 - 3.1 슬러지의 비저항 및 공극율
 - 3.2 슬러지의 물리화학적 특성
 - 4. 결론
- 참고문헌

1. 서론

생물학적 폐수처리 시설에서 배출되는 잉여 슬러지(excess sludge)는 물리적, 화학적, 그리고 생물학적 특성을 갖는다. 도시하수 슬러지에 대해서 Coackley와 Jones가¹⁾ Ruth와²⁾ Carman의³⁾ 이론을 적용한 이후, 잉여 슬러지의 침강 및 탈수성 분석에 관하여 많은 연구들이 슬러지의 입도분포(particle size distribution)와 슬러지의 세포로부터 생성된 체외 고분자 물질(extracellular polymer)의 함량을 주요인자로 취급하고 있다.

입도분포의 영향에 관한 문헌을 보면, Roberts와 Olsson은⁴⁾ 10 μ m이하의 콜로이드성 입자의 존재량이 활성슬러지의 탈수성을 결정하는 주요 원인 중의 하나임을 모관흡입시간(capillary suction time)의 측정을 통해 밝혔고, Karr와 Keinath는⁵⁾ 체분석의 개념을 갖는 입자 분류기법(fractionation technique)을 사용하여 슬러지의 입자들을 5개위 입자군으로 나누는 입도분석을 수행하여 1-100 μ m의 크기 범위를 갖는 supracolloidal solids가 슬러지의 탈수성에 가장 크게 영향을 주는 입자들인 것을 밝혔다. 일차 슬러지, 활성슬러지, 그리고 혐기성 소화 슬러지 등의 각각 종류가 다른 슬러지에 대하여 미리 분류한 입자군들을 사용하여 입자군별 구성비율을 변화시켜서 여과 케이크 평균 비저항을 측정 한 결과, 슬러지의 종류가 다를지라도 입자군별 구성비율이 일치하면 평균 비저항이 유사하게 나타나 입도분포가 비저항의 결정에 직접적으로 영향을 미치는 것을 보였다. Lawler⁶⁾ 등은 혐기성 소화의 운전조건이 소화슬러지의 입도분포와 탈수성에 변화를 주는데 대해서, 상호관계를 규명하기 위하여 실험적 연구를 수행하여, 체류시간, 유입 고형물 농도, 그리고, 일차슬러지와 활성슬러지의 혼합비 등과 같은 운전변수에 따른 입도분포의 변화로 말미암아 탈수성이 민감하게 반응함을 보였다. Novak 등은⁷⁾ 활성슬러지의 평균 입경이 40 μ m이하이고 입도분포가 비교적 광범위할때 미세입자가 케이크의 공극을 통해 여액의 흐름방향으로 이동하여 케이크의 폐색이 발생함을 보였

다. 이와 같이 여러 문헌에서 입자의 크기, 분포가 탈수성에 중요하게 영향을 미치는 것으로 확인되고 있어, 일차적인 비저항의 결정인자로서 분명히 작용하는 것으로 사료된다.

체의 고분자 물질에 의한 응결에 대하여는, LaMer와 Healy의⁸⁾ 콜로이드 계에서의 고분자에 의한 응집 이론으로부터 미생물의 응결(flocculation)을 설명하는 고분자 가교 모형(polymer-bridging model)은 상당히 현실적이다. 이 모형에서 미생물 응결은, 미생물에 의해 생성된 유기물질로서 고분자 전해질인 체외 고분자 물질과 미생물 입자의 상호작용으로 이해되며 가교로 구성된 미생물 플록(floc)은 침강성이 향상된다. Tenny와 Stumm은⁹⁾ 활성 슬러지에 대한 회분 실험에서 성장조건이 내생호흡 단계로 진입하면서 응결성이 향상되는 것을 확인하였는데, 1시간 침강 후의 상등액에 잔류하는 미세한 슬러지 입자의 전체 슬러지에 대한 COD분률로써 입자의 분산을 표시하여 응결성의 변화를 간접적으로 나타내었다. 조류에 대하여도 역시 내생호흡 단계로의 진입 초기에 체외 고분자 물질의 증산과 함께 응결성의 향상을 관찰하였다.¹⁰⁾ 일정시간 침강 후 상등액의 잔류탁도를 흡광도(absorbance)로써 표시하였는데, 50%의 흡광도를 나타낼 때 까지 공업적 고분자 응집제를 투여하여 동일한 응결성을 나타낼 때 까지 소요되는 응집제의 양을 측정된 실험에서도, 내생호흡 단계로의 진입 초기에 가장 적은 양의 응집제 투여로 동일한 잔류탁도를 얻을 수 있어 응집제가 절약된 양 만큼 응결성이 향상되었음을 보였다.

Ford와 Eckenfelder는¹¹⁾ 활성 슬러지 공정에서 유기물 부하율이 증가함에 따라 슬러지중에 탈수소 효소(dehydrogenase)의 함량과 부착수(bound water)의 양이 증가함을 보여, 슬러지의 활성과 이 두가지 요소의 상호관련을 나타내었다. kato 등은¹²⁾ 단백질 분해효소인 pronase-E를 사용하여 활성 슬러지 표면층으로부터 체외 고분자 물질을 제거하여 전자 현미경 사진을 통해서 고분자 물질층이 제거된 슬러지를 실제로 보였고, 그 슬러지는 응결성을 상실하여 각 입자가 분산됨을 확인하였다. pronase-E처리에 의해 상등액 중에 아미노산의 증가가 측정되었는데 효소처리된 슬러지의 성장속도가 원래의 성장속도를 그대로 나타내는 사실로부터, 단백질의 분해는 세포질에는 영향을 주지 않고 표면층에서만만 발생하였음을 추론하였다. 이 결과

는 pronase-E를 사용하여 표면층에서 단백질을 제거하면 체외 고분자 물질을 세포로부터 박리할 수 있음을 나타내었으며, 또한 체외 고분자 물질이 응결성을 나타내는 원인물질임을 보인 것이다.

Pavoni 등은¹³⁾ 포도당, 육즙, 살리실산, 초산 등을 기질로 사용한 회분실험으로부터, 성장조건이 내생호흡 단계(endogenous respiration phase)에 진입한 직후에 미생물 응결로 말미암은 탁도의 급격한 감소를 관찰하였고, 동일한 서점에서 체외 고분자 물질이 가장 활발히 생산되는 것을 확인하였다. 그리고, 체외 고분자 물질의 생분해성(biodegradability)은 매우 낮은 편으로서 식종 미생물이 적응하지 못한 상태에서 BOD:COD의 비가 0.1로 나타났으며, 구성성분은 다당류, 단백질, RNA, 그리고 DNA 등을 포함하고 있음을 보고하였다. Magara와 Nambu는¹⁴⁾ 고형물 체류시간에 따라 슬러지의 물리적, 생화학적 특성이 변화함을 보였고, 이와 같은 입자 특성의 변화에 따라 침강성이 달라짐을 나타내었다.

한편, 활성 슬러지 공정의 운전으로부터 슬러지 연령(sludge age) 또는¹⁵⁾ 고형물 체류시간이 잉여 슬러지의 탈수성에 미치는 영향을 연구한 문헌을 보면, Pitman은 고형물 체류시간이 11일 이상일 때 탈수속도가 가장 빨랐고 7일로 감소함에 따라 잉여 슬러지의 평균 비저항이 두드러지게 증가하여 탈수속도가 느림을 보였다. Lovett 등은¹⁶⁾ 인공적으로 만든 도축장 폐수를 활성 슬러지 공정으로 처리하는 실험을 통해 13일 이상의 고형물 체류시간에서 슬러지의 케이크 평균 비저항이 가장 낮게 나타남을 보였다. Knocke와 Zentkovich는¹⁷⁾ 실험실 규모와 실제 처리장에서의 고형물 체류시간이 잉여 슬러지의 탈수 특성에 미치는 영향을 비교, 연구하였는데, 침전지를 통과한 폐수를 주입하는 경우와 bacto-peptone을 함유하는 인공하수를 주입하는 경우에 대해서, 평균비저항의 크기에는 약간 차이가 있으나 공통적으로 고형물 체류시간이 9일 보다 클 때에 비저항이 최소로 되어 탈수성이 가장 향상되는 것으로 나타났고, 고형물 체류시간이 4일로 감소함에 따라 탈수성은 급격히 악화되었다.

Wu 등은¹⁸⁾ 고형물 체류시간과 기질의 조건이 잉여 슬러지의 탈수성을 지배함을 보였는데, 고형물 체류시간이 15일 부근에서 케이크 평균 비저항은 최저치를 보였고, 질소가 풍부한 폐수일수록 비저항이 낮게 나

타났고 질소가 제한요소로 작용하는 폐수에서 얻어진 잉여 슬러지는 케이크 평균 비저항이 매우 높게 나타났다.

호기성 소화 슬러지의 탈수성에 관한 문헌은 많지 않았지만, Katsiris는¹⁹⁾ 차등 열분석(differential thermal analysis)에 의한 부착수(bound water)의 측정 방법을 이용하여 슬러지 처리방법에 따라서 부착수의 양이 변화함을 보였다. 활성슬러지에 대한 22일간의 호기성 소화를 통해서, 초기에 건조 고형질 질량의 1600%이던 부착수의 양이 500%로 감소하였고, 또한 총고형물량 61%, 유기성 질소 38%, 그리고 탄수화물 45%의 감소율을 나타내었으며 평균 비저항은 호기성 소화 4일 후부터 급격히 증가하여 22일 후에는 19배로 증가하는 것으로 나타났다.

케이크 여과의 특성해석에 관하여는 **李**와 **鄭**이²⁰⁾, 이미 소개한 바 있는데, Tiller는 자신이 발표한 케이크 여과의 구성식을 다시 수정하여 고형물 압축력과 비저항의 관계와 고형물 압축력과 공극율의 관계에 대하여 다음의 식들을 제시하였다.

$$\alpha = \alpha_0(1 + p_s / p_a)^n \quad (1)$$

$$1 - \epsilon = (1 - \epsilon_0)(1 + p_s / p_a)^\beta \quad (2)$$

여기서, α 는 비저항, ϵ 은 공극율, n 은 압축계수, p_s 는 고형물 압축력이다. α_0 와 ϵ_0 는 고형물 압축력이 존재하지 않을 때의 비저항과 공극율을 이론적으로 의미하며, p_a 와 β 는 실험결과의 수식화를 위해 도입된 경험상수이다. 다수의 여과이론 중에서 그가 개정하여 제시한 이론은 탈수성의 해석에 유익한 정보를 제공하는데, 본 논문에서는 Tiller의 이론에 관한 설명은 생략하였다.

잉여 슬러지의 호기성 소화는 내생 호흡단계에서 호기성 미생물의 자기분해를 통하여 슬러지를 감량화 또는 안정화하는 공정인데, 생물학적 슬러지의 성장조건에 따라 슬러지의 물리적, 생화학적 특성이 변하는 사실은 호기성 소화에서도 동일하게 적용될 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 호기성 소화 슬러지의 소화일수에 따른 케이크 여과특성 변화를 Tiller의 여과이론을 통해 해석하고, 또한 호기성 소화에 따른 슬러지의 화학적 구성, 체외 고분자 물질의 함량, 슬러지의 pH, 여액의 수질 등을 실험적으로 조사하여 탈수성 관련인자로서 슬러지의 물리화학적 특성변화를 연구하였다.

2. 실험재료, 장치 및 방법

2.1 실험재료

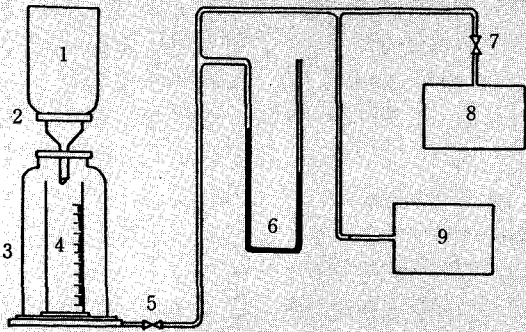
잉여 슬러지를 채취한 청량음료 제조업체의 활성 슬러지 공정은 수리학적 체류시간 24시간, 고형물 체류시간 30일로 운전되었고 슬러지의 구성성분은, 휘발성 고형물량(mixed liquor volatile suspended solids, MLVSS)에 대한 비율로서, 탄수화물 26.5%, 단백질 24.0%, 그리고 지방질은 0.9%이었다.

호기성 소화에 따른 슬러지의 케이크 여과특성을 조사하기 위하여 잉여 슬러지를 실험실에서 연속 포기하였다. 실험장치로서는 1.3ℓ 용량의 유리병과 송풍량이 1.2ℓ/min인 공기펌프를 한 조로 하여 모두 18조의 회분식 반응조를 항온조에 설치하여 30±1°C의 온도조건에서 호기성 소화를 수행하였다. 실험기간 동안 각 반응조의 용존산소 농도는 4.0mg/ℓ 이상을 유지하였으므로 호기성 소화에 충분한 조건을 제공하였다.

2.2 부크너 펀넬 시험(Buchner funnel test)

압력구간을 0-10N/m², 10-10⁴N/m², 10⁴-10⁵N/m²의 세 구간으로 나누어 각각에 적합한 별도의 장치를 사용하여 평균 비저항을 측정하였다. 본 연구에서는 10⁴-10⁵N/m²의 압력구간에 대해서는 진공발생기로 전력시 진공 펌프를 사용하였고, 1m높이의 수은 액주계로서 압력을 측정하였으며 10-10⁴N/m²의 압력구간에 대해서는 진공 발생기로 아스피레이터(aspirator)를 사용하였고 3m높이의 증류수를 채운 액주계로써 압력을 측정하였다.

케이크의 평균비저항을 측정하기 위한 부크너 펀넬 시험장치의 개략도는 그림 1과 같으며, 여재로는 공극의 크기가 7μm인 Toyo 5A 여과지를 사용하였다. 평균 비저항 측정을 위한 부크너 펀넬 시험은 다음 순서에 의해서 실시하였다: 1) 시료를 잘 흔들어 균일하게 분산된 상태가 유지되게 한다. 2) 여과병에 연결된 밸브를 닫고 감압장치를 가동하여 실험에 적용할 압력차를 만들고, 압력 조절 밸브를 조작하여 정해진 압력차를 유지한다. 3) 펀넬에 시료를 붓고 여과병에 연결된 밸브를 여는 것과 동시에 탈수가 시작된다. 4) 일정한 시간간격으로 여액량의 체적을 측정한다. 5) 분당 여액량이 1ml이하가 되면 시험이 종료된 것으로 본다.



- | | |
|------------------------|-------------------------|
| 1. Funnel | 6. Manometer |
| 2. Filter Support | 7. Vacuum Control Valve |
| 3. Bottomless Bottle | 8. Vacuum Generator |
| 4. Volumetric Cylinder | 9. Vacuum Tank |
| 5. Valve | |

그림 1. Schematic diagram of Buchner funnel test apparatus.

측정을 시도하였는데 10^2N/m^2 이상의 압력구간에 대해서는 그림 2에 나타난 황동제 압축실을 사용하여 압축시험을 실행하였다. 압밀시험기(consolidometer)와 여러가지 무게의 하중재를 사용해서 상판에 원하는 크기의 하중이 전달되게하여 압력을 조절하였고 슬럿지가 채워지는 압축실의 크기는 직경 6cm, 두께 2cm이었다. 하중이 한번 가해져서 약 24시간이 지난 후에 압축이 완료 되는 것으로 간주하였다. 케이크의 함수율은 건조에 따른 질량차를 습윤질량으로 나누어 결정하였으며, 케이크의 공극율은 함수율과 고형물 밀도로부터 계산하였다.

부크너 펀넬 시험을 실행하는 동안 비교적 장시간이 경과하면 여과시간 / 여액량 : 여액량의 기울기가 증가하는 것을 종종 관찰할 수 있는 것은 케이크의 폐색에 의하여 케이크의 총저항이 급격히 증가하기 때문으로 판단되었다. 따라서, 본 연구에서는 케이크의 폐색은 논외로 하여, 초기 3분간의 실측값으로부터 최소자승법(least square method)에 의하여 기울기를 결정하고 케이크의 평균 비저항을 산출하였다. 예비실험을 통해서 상관계수(correlation coefficient)의 크기가 대체로 0.98이상으로 나타나 뚜렷한 선형관계를 보였다. 시료의 양은 50ml을 대체로 사용하였고 호기성 소화에 의해 탈수성이 나빠졌을 때는 25ml을 적용하였다. 케이크의 고형물 질량 분률(solids mass fraction)은, 슬럿지의 액면이 가시적 케이크 표면에 도달하는 순간에 여과를 중지하고 케이크를 들어내어 103°C 에서 건조시켜 측정하였다. 여액의 점도는 동일한 온도에서의 물의 점도와 같다고 가정하였으며, 실험 기간 중 로터(rotor)형 RION 점도계(viscometer)를 사용하여 여액의 점도를 주기적으로 실측하여 이를 확인하였다.

2.3 압축시험

$0-10^6 \text{N/m}^2$ 의 광범위한 압축구간에 대해 공극율 환경관리인. 1993. 8

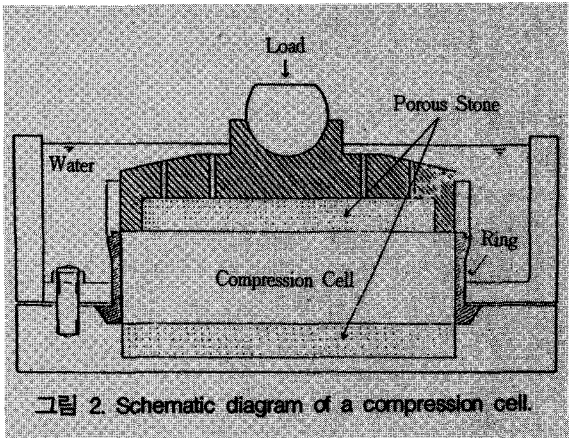


그림 2. Schematic diagram of a compression cell.

2.4 침강시험

$0-10^2 \text{N/m}^2$ 의 압력구간에서 공극율을 구하기 위해서는 평균비저항 측정때와 마찬가지로 Shirato등이²³⁾ 제안한 기법을 이용하였으며, 직경 5.7cm인 1l 용매스실린더를 사용하고, 슬럿지의 초기 농도를 다르게 해서 침강시험을 실행하여 초기 침강속도와 슬럿지 고형물량에 따른 평형 계면높이의 변화를 측정하고 공극율을 계산하였다. 종말평형계면로는 슬럿지 부상이 일어나기 직전까지 계면강하를 관측하여 10일이 경과한 후의 계면높이로 간주하였다.

2.5 시료의 분석

시료의 분석은 pH, 알칼리도, MLSS, MLVSS, D-O, 점도, 여액의 COD, 슬럿지의 성분구성, 비중, 체외 고분자 물질 등의 항목에 대해 수행하였으며, 그 분석방법은 표 1에 나타난 바와 같다. 체외 고분자 물질의 분석은 Gehr와 Henry의²⁴⁾ 방법에 준하여 실행하였

표 1. Analytical methods used in this study.

Items	Analytical Methods
pH	pH meter
Alkalinity	Potentiometric Titration
MLSS	Standard Methods ⁽²⁵⁾
MLVSS	Standard Methods ⁽²⁵⁾
DO	Membrane Electrode Method
COD	Standard Methods ⁽²⁵⁾
Specific gravity	Pycnometric Method
Extracellular Polymer Carbohydrate	High-speed Centrifugation ⁽²⁴⁾
Protein	Anthron-sulfuric Acid Method ⁽²⁶⁾
Lipid	Lowry Method ⁽²⁷⁾
Viscosity	Bligh-Dyer Modified method ⁽²⁸⁾
	Rotor Viscometer

으며 절차는 다음과 같다: 1) 입구가 큰 피펫을 사용하여 40ml의 슬러지 시료를 취해서 50ml용적의 원심분리관에 담는다. 2) 원심분리관을 1470G의 조건에서 5분간 원심분리한다. 3) 원심분리관에서 상등액을 조심스럽게 제거한다. 이 과정은 세척단계의 의미를 가지며, 상등액으로부터 추출되는 체외 고분자 물질의 양을 슬라임 물질(slime material)이라고 칭한다. 4) 중

류수를 채워 40ml로 만들고 다시 혼합하여 100ml용적의 비이커에 옮긴다. 5) 초음파기(ultrasonicator)에 의해 20W 출력조건에서 10분간 음파진동을 가한다. 6) 슬러지를 원심분리관에 옮기고 13200G의 조건에서 15분간 고속 원심분리한다. 본 연구에서는 고속 원심분리기로 미국 Beckman사의 model J2-2고속 원심분리기를 사용하였다. 7) 상등액을 250ml용적의 플라스크에 옮기고 비극성 용매인 에틸알코올을 80ml가한다. 8) 플라스크를 충분히 흔든 다음 마개를 하고 4°C의 냉장고에 18시간 동안 냉장한다. 9) 냉장 후에 유리섬유 여과지를 사용하여 불용성 침전물을 걸러낸다. 침전물이 걸러진 여과지를 증발접시에 담는다. 10) 건조기를 사용하여 80°C에서 1시간 동안 건조시킨 후 여과지에 걸러진 체외 고분자 물질의 중량을 분석저울에 의해 칭량하여 교감물질(capsular material)의 양으로 표시한다. 11) 불활성 물질의 함량을 결정하기 위해서는 건조된 시료를 전기로에 넣고 550°C에서 15분간 태워서 측정 후 계산한다.

(다음호에 계속)

시간안내

본 연합회에서는 최근에 개정된 법규 내용을 수록한 「환경관계법규 I, II」를 발행합니다.

▲ 환경관계법규 I

(4×6배판, 820쪽, 16,000원)

- 환경정책기본법
- 환경영향평가법
- 환경오염피해조정법
- 대기환경보전법
- 수질환경보전법
- 소음·진동규제법
- 유해화학물질관리법

▲ 환경관계법규 II

(4×6배판, 800쪽, 16,000원)

- 폐기물관리법
- 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률
- 합성수지 폐기물 처리 사업법
- 적출물 등 처리규칙
- 폐기물의 국가간 이동 및 그 처리에 관한 법률
- 오수·분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률
- 환경개선비용부담법
- 자연환경보전법
- 해양오염방지법
- 오존층 보호를 위한 특정 물질 제조 규제 등에 관한 법률
- 환경범죄의 처벌에 관한 특별 조치법